



De la dimension infinie à la dimension prospective : variations autour du paradigme d'optimalité

Nadia Maïzi

► To cite this version:

Nadia Maïzi. De la dimension infinie à la dimension prospective : variations autour du paradigme d'optimalité. Optimisation et contrôle [math.OC]. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2012. tel-00777330

HAL Id: tel-00777330

<https://theses.hal.science/tel-00777330>

Submitted on 17 Jan 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de Nice Sophia-Antipolis

Ecole Doctorale 84 - STIC

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

présentée par

NADIA MAÏZI

**De la dimension infinie
à la dimension prospective**

variations autour du paradigme d'optimalité

soutenue le 20 Juillet 2012

devant le jury composé de :

Catherine Bonnet	Directrice de Recherches, Inria	Examinatrice
Yves Maréchal	Professeur des Universités, Grenoble-INP	Rapporteur
Jean-Paul Marmorat	Directeur de Recherches, MINES ParisTech	Rapporteur
François Mirabel	Professeur des Universités, Université d'Artois	Rapporteur
Vincent Mazauric	Directeur Scientifique, Schneider electric	Examineur
Marc Bordier	Chargé de Recherches, MINES ParisTech	Invité

*A mon équipe, à mes collègues, à mes élèves, à mes amis, à ma famille,
A Gaston Berger, romanesque philosophe, guide de cette trajectoire scientifique.*

et en particulier mes remerciements

à Catherine Auguet-Chadaj, qui a rendu possible une escapade rédactionnelle pour enfin clore ce dossier. Je lui en suis extrêmement reconnaissante. Et pour le reste.

à mon Jury. Je suis ravie d'avoir pu rassembler des collègues, maitres ou référents, que j'estime et avec qui j'ai pu avoir des échanges privilégiés au cours de toutes ces années. Alors je ne serai pas trop formelle, car bien que cet exercice soit formel, j'ai aussi souhaité en faire un moment particulier de retrouvailles :

merci à La fille, Catherine, témoignage s'il en fallait que la parité en ce jour n'est toujours pas respectée.

et merci aux garçons, Marc, Paulo, François, Vincent et Yves, d'avoir accepté de venir me supporter, dans toutes les acceptions du terme bien sur.

à tous ceux qui m'ont accompagné dans cette aventure, pas vraiment calculée.

Ils m'auront permis de créer autour d'intuitions, très contestées il y a 10 ans, une stratégie de recherche qui a fait du CMA un laboratoire dont les préoccupations sont au coeur des enjeux contemporains. Il fallait y croire, et ils y ont cru ...

Préambule

Ce manuscrit est divisé en deux parties.

La première partie est consacrée à mon parcours académique.

J'y présente un curriculum vitae détaillé, qui décrit mes activités de recherche, d'enseignement et d'encadrement de façon synthétique.

Je détaille alors, en deux rubriques distinctes, certains éléments marquants relatifs aux

- activités de responsabilité collective et d'animation scientifique
- et activités pédagogiques

que j'ai exercées.

Enfin je propose une liste exhaustive de mes publications, communications, conférences, ...

Dans la seconde partie, je propose une déclinaison de mes activités de recherche à la lumière du paradigme optimal, pour remonter de mes travaux de thèse à des réalisations très récentes.

J'envisagerai enfin un prolongement pour cette trajectoire scientifique.

Table des matières

I	PARCOURS ACADÉMIQUE	1
II	DE LA DIMENSION INFINIE À LA DIMENSION PROSPECTIVE <i>variations autour du paradigme d'optimalité</i>	33
1	Retour sur le paradigme d'optimalité	37
2	Des problèmes de contrôle, de leur formulation optimale et de la question du critère	43
3	Des problèmes complexes liés à l'énergie et au climat	49
4	L'approche prospective, socle d'une démarche pour le long terme	61
5	Perspectives	83
III	Annexes	91

Première partie

PARCOURS ACADÉMIQUE

Mots Clés :

Contrôle et Théorie des Systèmes. Programmation mathématique. Recherche opérationnelle et Optimisation. Modélisation Prospective long terme.

Curriculum Vitae

MAÏZI Nadia

Professeur à MINES ParisTech
Directrice de Centre

EXPÉRIENCE PROFESSIONNELLE

- Depuis Décembre 2008 : Fondation et Co-Direction de la Chaire ParisTech Modélisation Prospective au service du Développement Durable
- Depuis Juin 2000 : Direction du Centre de Mathématiques Appliquées (CMA)
- Depuis Janvier 1999 : Fondation, et responsabilité pédagogique du mastère Optimisation des Systèmes Energétiques (OSE) de MINES ParisTech
- 1997-2000 : Adjointe au Directeur de l'Institut Supérieur en Informatique et en Automatique (ISIA) de l'Ecole des Mines de Paris
- 1995-2000 : Responsable d'option à l'ISIA
- Depuis 1995 : Chercheur au CMA

FORMATION ACADÉMIQUE

- 1994 : Visiting scientist, Stanford University.
Post doctorat au sein du Robotics Laboratory, Computer Science Department. Pr. O. Khatib.
- 1989 - 1992 : Thèse en Automatique (formation doctorale Informatique Temps Réel Robotique et Automatique) de l'EMP.
- 1988 - 1989 : DEA d'Automatique et de Traitement du signal, option Image et Sciences de l'Univers, commun à l'Université de Nice et à l'EMP.
- 1986 - 1988 : Diplôme d'ingénieur civil de l'EMP (P85).

-
- 1982 - 1986 : Maîtrise de Mathématiques Pures, Université Aix-Marseille I.

LANGUES ÉTRANGÈRES

- Anglais : courant.
- Arabe : lu, écrit.

PRINCIPALES RESPONSABILITÉS SCIENTIFIQUES ET ADMINISTRATIVES :

- Directrice du Centre de Mathématiques Appliquées depuis 2001.
- Co-directrice de la Chaire ParisTech Modélisation Prospective au service du Développement Durable (MPDD) depuis Décembre 2008.
- Chef de la délégation ParisTech à l'UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) depuis 2009.
- Déléguée pour la France dans le programme ETSAP de l'AIE (Agence Internationale de l'Energie) depuis 2008.
- Collaborateur scientifique du projet TOSCA (TO Simulate and CALibrate stochastic models) (Inria) depuis 2005.
- Responsable pédagogique du Mastère spécialisé de la Conférence des Grandes Ecoles OSE (Optimisation des Systèmes Energétiques) depuis 1999.

DISTINCTIONS ET SOCIÉTÉS SAVANTES :

Chevalier de l'Ordre National du Mérite.

Chevalier des palmes académiques.

Membre SMF, SIAM, IEEE, IAEE.

PRINCIPALES ACTIVITÉS DE RECHERCHE :

Thèmes de recherche :

Contrôle et Optimisation. Recherche Opérationnelle. Modélisation pour l'Economie, l'Energie, l'Environnement. Modélisation Prospective pour le long terme.

Parmi les projets de recherche initiés :

Projet européen OPTIMATE (FP7) : responsable du module Day ahead, dédié au prototypage optimal du design de marché de l'électricité pour la mise en place d'une plateforme unique d'échanges entre gestionnaires de réseaux à l'échelle européenne ; partenaires RTE, EnBW, REE, GmBH, ELIA, RiSOE, KU Leuven (depuis 2009).

Optimisation face au risque marché : optimisation convexe non différentielle pour l'étude des coûts marginaux de la cogénération ; impact de la volatilité des ressources fossiles sur les investissements de long terme. Projet Carnot MINES (depuis 2008)

Evaluation du Prix du CO₂ pour les producteurs d'électricité : approches croisées basées sur le prix d'indifférence (optimisation dynamique stochastique), la théorie des jeux, le coût marginal : collaboration Inria/TOSCA, ADEME (depuis 2008).

Intégration d'une approche variationnelle de l'électromagnétisme pour la représentation des contraintes dynamiques de fiabilité du réseau électrique dans les modèles de prospective long terme : fiabilité, smart grid, en partenariat avec Schneider electric depuis 2005 et soutenu par le Carnot MINES depuis 2010.

Programme de recherche de la Chaire ParisTech Modélisation Prospective au service du Développement Durable (depuis 2008) soutenue par ADEME, EDF, Renault, TOTAL et Schneider Electric :

- déploiement d'un modèle optimal dédié à l'eau et à l'énergie
- déclinaison optimale des engagements internationaux sur le climat : plausibilité technique et soutenabilité
- croissance verte, croissance soutenable ou décroissance : vision prospective long terme

Conseil d'Analyse Stratégique (services du Premier Ministre) : en charge de la modélisation MARKAL-Times France à l'horizon 2050 dans le cadre du groupe scénarios énergétiques de la Commission énergie (2007-2008), de la Commission Energie 2050 (2011-2012).

Pôle MER-PACA à vocation mondiale : montage du projet SECMAR (sécurisation des zones maritimes) coordonné par Thales Underwater Systems (2006-2010).

Responsable du projet de recherche HYBRISIM (HYBRId SIMulation) labellisé dans le cadre du PREDIT 2002-2005 en partenariat avec Renault et le Collège de France (LPPA) : commande et perception de conduite.

Responsable du projet de recherche EPEE (Enjeux environnementaux et planification énergétique européenne) réalisé dans le cadre du Conseil Français de l'Energie (2001-2005).

Bourses de l'électricité : responsable de la collaboration avec l'Inria sur le problème de la modélisation des prix. (2002-2004)

EVALUATION SCIENTIFIQUE

- Membre du Comité consultatif du Commissariat Général à l'Investissement pour le Comité thématique du Programme d'Investissement d'Avenir, Economie circulaire et énergies décarbonées, présidé par Thierry Chambolle, depuis 2010.
- Expert mandaté auprès de la Direction Exécutive Stratégie, Recherche et International pour élaborer la feuille de route stratégique sur les réseaux électriques intelligents de l'ADEME.
- Expert évaluateur pour l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) (depuis 2007).

-
- Expert évaluateur pour la Commission Européenne (Cooperation Programme of the 7th Research Framework Programme) 2011 et 2012.
 - Expert évaluateur pour l’Appel à Projets Recherche 2012 du Conseil régional d’Aquitaine 2012.
 - Expert évaluateur pour le Comité ECOS-Nord (Evaluation-orientation de la COopération Scientifique) 2011.
 - Expert évaluateur pour le NSERC (Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada), 2010.
 - Referee d’articles : conférences IEEE (Control Conference and Application, IPEC) ; Journal (Journal of Scientific Computing, Energy Policy Journal, Energy Economics), IFAC et IEEE Conferences.

COMITÉS ET PROGRAMMATION SCIENTIFIQUE :

- Membre du Comité scientifique de EngOpt (International Engineering Optimization Conference) depuis 2009.
- Membre du Comité de Programme pour la Conférence EURO (European Research Operational Conference) : Chair du Stream ”Long term planning for energy, climate and environment” depuis 2010.
- Membre du Comité scientifique de la Chaire ParisTech Modélisation Prospective.
- Coordination scientifique du Campus Sophia Tech de l’Université de Nice Sophia-Antipolis : responsable de l’axe Modélisation, simulation et technologies pour l’Environnement, les Risques et le Développement Durable depuis 2011.
- Chair et organisateur du Mini symposium ”Optimization in Electrical Engineering” International Engineering Optimization Conference, Sept 2010 (3 sessions) :
 1. variational approaches of electromagnetism, especially to provide a relevant decomposition of the losses to cut, and efficient numerical methods ;
 2. device optimization, either for power conversion (motors, alternators, transformers ...) or couplings (busways) ; system optimization, regarding to power management issues (reliability, mix-arbitration, competition between sectors ...) ;
 3. long term planning, including sustainability challenges, CO2 curtailment, reduction in fossil fuel use, policy changes for large scale adoption.
- Chair pour la Conférence EURO (European Research Operational Conference) du Stream ”Long term planning for energy, climate and environment” : July 2010, 4 sessions - Mathematical models for energy and environment ; Meeting the targets : policy and measures ; Energy and technological system issues ; Long term planning for agriculture and forestry - ; July 2012, 3 sessions - Pathways toward low carbon transport ; Post Fukushima ; Smart cities and Smart grids. -
- Manifestations de la Chaire ParisTech Modélisation Prospective

-
- Journées Internationales de la Chaire Modélisation prospective : Le rôle du nucléaire après les événements de Fukushima, 15 et 16 mars 2012 - MINES ParisTech, Sophia Antipolis.
 - Colloque Chaire ParisTech/ Mastère OSE/Université de Corte : Les externalités de l'énergie ; Mai 2010 Ajaccio.
 - Programme scientifique de la Journée annuelle de la Chaire : 20 novembre 2009 - 17 novembre 2010 - 11 octobre 2011 - 3 Octobre 2012.
 - Colloque International inaugural de la Chaire en partenariat avec l'ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme) à Sophia Antipolis le 16 décembre 2008.
 - Side event ParisTech dans le cadre de l'UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change Conference) :
 “Beyond the financial crisis : Regional energy policy and global carbon constraints” COP15 Copenhagen, 12 Décembre 2010 ; “Long-term prospective of business contribution to low-carbon development” COP17 UNFCCC Copenhagen, 6 Décembre 2012.
 - Editeur associé pour la conférence IEEE Control Conference and Application, CCA, ISIC and CACSD 2006, October 4-6, 2006, Munich, Germany.
 - Membre du comité scientifique du colloque en l'honneur du 60ème anniversaire de Pierre Bernhard (29 et 30 Mars 2005, Inria Sophia-Antipolis).
 - Membre fondateur et membre du conseil d'administration de l'association eden, *pour une conscience énergétique européenne* (2004-2007) ;
 - Membre du groupe de travail sur les Technologies de l'Information et de la Communication é l'EMP (2001).
 - Membre de la commission pour la création de l'Ecole Polytechnique Universitaire de l'Université de Nice Sophia-Antipolis, 2000.
 - Membre du comité d'organisation du colloque “Computational Kinematics” 4-6 Sept 95 à Sophia Antipolis.
 - Co-organisation du colloque Franco-Canadien de “Robotique d'Intervention” 2-5 Mai 95 à Sophia-Antipolis.

PRINCIPALES ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT :

Responsable du module Optimisation (150h) du Mastère OSE : en charge des enseignements de *Programmation mathématique, Recherche opérationnelle, Optimisation des systèmes énergétiques* 50h (depuis 2000).

Responsable de l'Enseignement spécialisé de 3ème année de l'Ecole des Mines de Paris, *Modélisation Prospective : principes et usages des modèles mathématiques pour l'évaluation des politiques de lutte contre le changement climatique* 15h.

Co-responsable du module de 3ème année de l'Ecole des Mines de Nancy : *Analyse*

comparée des filières énergétiques. Stratégies énergétiques en charge de 6h d'enseignement.

Modélisation prospective pour les enjeux de long terme, Master Economie du Développement Durable, de l'Environnement et de l'Energie (EDDEE) (depuis 2011 (6h)), Ecole des Mines de Nancy (depuis 2008 (3h)), Magistère Sonatrach/Sonelgaz (Alger) 2008, Ecole Centrale Lille 2007.

Commande et Théorie des Systèmes (Ecole des Ponts et Chaussées, EMP, ISIA et École Supérieure des Sciences informatiques (ESSI) et Ecole des Mines de Saint Etienne (entre 1994 et 2003)).

Mathématiques Appliquées à l'étude des systèmes écologiques (Ecole d'été du CNRS à Villefranche sur mer).

Conception et encadrement de projets de Contrôle et d'Optimisation à l'aide de logiciels scientifiques : matlab/simulink, modeleur Ampl.

AUTRES RESPONSABILITÉS ADMINISTRATIVES :

Membre suppléant de la commission consultative paritaire de l'Ecole des Mines de Paris depuis 2000.

Membre élue au comité pédagogique et comité d'enseignement de l'Ecole des Mines de Paris (1998-2001).

Détail des activités de responsabilité collective et d'animation scientifique

Direction du CMA depuis Juin 2000

A mon arrivée à la direction du Centre de Mathématiques Appliquées en Juin 2000, le Centre connaissait de grands bouleversements : une partie de l'équipe ayant participé au développement du langage Esterel quittait le laboratoire afin de réaliser une industrialisation des réalisations du projet de recherche. Il s'agissait donc à la fois de redéfinir l'organisation interne du CMA et de dessiner ses nouvelles orientations scientifiques.

J'ai proposé un nouveau fonctionnement du Centre basé sur une plus grande synergie entre les chercheurs du laboratoire grâce à une articulation autour de l'Optimisation. Il s'agissait alors d'élaborer une réorientation des activités de recherche du laboratoire (en partie développé dans la partie II). J'ai fédéré les thèmes scientifiques informatique temps réel, optimisation et automatique autour d'applications privilégiées issues des domaines de l'énergie, de l'espace, de l'automobile.

Les conséquences de ce redéploiement des activités du centre ont été multiples : elles se sont concrétisées par des projets de recherche, des contrats industriels, - l'activité de recherche partenariale annuelle du CMA a été rééquilibrée et a progressé de 600 - 650 Keuros annuels à partir de 2002 pour atteindre 1 MEuros annuels en 2012 - la création de programmes d'enseignements et des collaborations avec d'autres équipes de recherche. En particulier, cette fédération thématique s'est traduite par le renouvellement de l'intitulé de la formation doctorale animée par le CMA, désormais "Contrôle, Optimisation et Prospective" (depuis 2009).

Quelques réalisations initiées pour exemple, ont été :

1. **Une déclinaison des mathématiques aux questions d'énergie, d'économie, d'environnement.**

J'ai initié au CMA le projet de recherche dédié à la Modélisation pour l'Energie, l'Environnement, l'Economie dont l'objet est de dégager une expertise originale pour aborder les mutations du monde de l'énergie. Ce projet regroupant des compétences en modélisation, théorie des systèmes, recherche opérationnelle, mathématiques du contrôle et de la décision, informatique du temps réel a permis de nouer des partenariats de recherche avec :

- le CREDEN (Centre de Recherche en Economie de l'Energie de la Faculté de Sciences Economiques de Montpellier I), le CIRED (Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement).

- l’institut INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique)
- la Katholieke Universiteit Leuven (KUL) dans le cadre d’un projet intégré européen NEEDS (New Energy Externalities Development for Sustainability, FP6).
- EDF (plusieurs thèses ont été menées en collaboration)
- Schneider Electric (plusieurs thèses ont été menées en collaboration)
- Conseil Français de l’Energie (une thèse)
- IFP (Institut Français du Pétrole) (projet dans le cadre de la fondation Tuck)

Au delà ce projet a conduit à la création des deux programmes phare du Centre de Mathématiques Appliquées : la Chaire ParisTech et le mastère spécialisé sur lesquels nous reviendrons.

2. **Projet spatial**

Les partenariats de recherche concernent des approches issues de la synthèse robuste multi-critères de correcteurs, et différentes stratégies de commande (par magnétocoupleurs, par poussées électriques et chimiques) pour le maintien à poste ou la stabilisation de l’attitude de satellites. Sont également abordées des techniques d’optimisation pour établir des stratégies avec assistances gravitationnelles pour des missions interplanétaires. Les partenariats mis en place depuis mon arrivée au CMA concernent :

- l’ESA (Agence Spatiale Européenne) et le DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) (thèse Joris Olympio 2008)
- la Technical University of Eindhoven et l’ESA (cadre d’une étude sur véhicule thermique muni de grands appendices gonflables)
- le Politecnico de Milan/ Alcatel Space Industries (thèse Damiana Losa)
- CNES (Centre national d’Etudes Spatiales)/Alcatel Space Industries (thèse de Christian Fisher soutenue en Juillet 2011)

3. **Commande et perception de la simulation de conduite**

Les partenariats de recherche décrits en détail dans la partie II ont englobé essentiellement deux thèses (Mehmet Dagdelen en 2005 et Hatem Elloumi en 2009) dans le cadre de collaborations que j’ai mises en place avec :

- le METL (Ministère des transports) via un programme PREDIT, le projet HYBRISIM
- le Collège de France (Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l’Action)
- Renault, Centre Technique de Simulation, Direction des Recherches

4. **Mise en place d’une chaire ParisTech**

J’ai été à l’initiative de la création d’une chaire industrielle sur le thème de la modélisation (économique et technologique) long terme sur les enjeux énergie/climat. Cette chaire intitulée Modélisation prospective au service du développement durable a été initiée en 2008 (cf www.modelisation-prospective.org)

La mise en place cette structure a nécessité les réalisations suivantes :

- Définition du programme scientifique (cf partie II).
- La mise en place du partenariat académique (CIRED (ENPC et AgroParisTech), ParisTech et MINES ParisTech).
- La mise en place du parrainage industriel (Renault, TOTAL, SCHNEIDER Electric, EDF) et institutionnel (ADEME), chaque parrain contribuant à hauteur de 100 kEuros/an sur 5 ans.
- L’élaboration de la convention (11 partenaires signataires).
- L’animation pluriannuelle (cf partie II).

Détail des activités pédagogiques

Les grands projets pédagogiques

Le mastère spécialisé OSE

J'ai été co-fondatrice et responsable pour le CMA du groupe inter-centre OSE (commun au CMA et au Centre Énergétique de MINES ParisTech et initié en Mars 1998); l'initiative OSE pour Optimisation des systèmes énergétiques, et les réflexions menées en son sein ont été à l'origine de la création du mastère Optimisation des Systèmes Energétiques dont le succès a été fêté lors de son dixième anniversaire à Ajaccio en Corse en 2011 au cours d'un Colloque dédié aux "Externalité de l'Energie".

A l'initiative de la création du mastère spécialisé en Janvier 1999, j'ai mis en place avec mes collègues enseignants les éléments nécessaires à la constitution du projet :

Réalisation du projet pédagogique, étude de marché, constitution d'un réseau de partenaires : d'une part, un partenariat académique avec l'EDHEC Nice (Ecole de Hautes Etudes Commerciales pôle niçois) et le CREDEN de la Faculté de Montpellier I (Centre de recherche en économie et droit de l'énergie); d'autre part la mise en place d'un réseau de partenaires industriels (Air Liquide, Renault, EDF, Gaz de France, Schneider Electric, AREVA, Aéroports de Paris, SOREGIES, Arcelor, ...). L'animation annuelle du mastère, qui en est à sa douzième promotion, consiste en ce qui suit :

- Animation des comités de pilotage annuels.
- Participation aux jurys de recrutement : sélection de 16 à 20 élèves parmi 200 dossiers reçus pour constituer des promotions avec un groupe issu principalement d'Ecoles d'ingénieur (Polytechnique, Normale Sup, Ecole des Mines (Saint Etienne, Nantes, Nancy, Douai), ESPCI, INPG, Supélec, ECAM, INSA) et parfois d'Ecoles de Commerce (ESCP, HEC.)
- Suivi pédagogique de la promotion en cours à travers
 - le suivi du projet de promotion : suivant les années, un colloque, un salon spécialisé, une table ronde et la production d'un livre sur un sujet d'étude commun à la promotion
 - du voyages d'études : une semaine de visites d'industriels (8j) : Italie (2002), Norvège (2003), Brésil (2004), Chine (2005), Inde (2006), Japon (2007), Caraïbes (2008), Chili (2009), Afrique du Sud (2010), Nicaragua (2011), Etats-Unis (2012).
 - l'encadrement et le suivi général de la scolarité
 - l'encadrement de missions professionnelles
- l'animation scientifique du réseau de partenaires industriels
- le montage de certaines missions industrielles (un CA annuel de 450 keuros (en moyenne))

-
- la définition et l’organisation du module d’optimisation et d’aide à la décision qui évolue chaque année pour suivre les questions liées à l’actualité de l’énergie.

L’ISIA (1993-2000) en tant que Responsable des études puis Directrice adjointe de 1997 à 2000

Avant ma nomination à la direction du CMA, j’ai été Directrice adjointe de l’Institut Supérieur en Informatique et en Automatique (ISIA), tout en effectuant un mi-temps recherche au CMA. L’ISIA était un institut dédié à la formation, je rappelle ici ce qu’étaient mes principales attributions.

- *Responsable des études* Dans le cadre de ma mission de Responsable des études de l’ISIA j’ai coordonné et enseigné dans un parcours pédagogique qui se déclinait en
 - 1000 h de cours d’Informatique et d’Automatique organisées pour un cursus de deux ans de formation spécialisée en Informatique industrielle
 - Structuration de l’enseignement de l’Automatique par une approche orientée vers les préoccupations du monde industriel : automatique, commande non linéaire, automatique avancée, filtrage et traitement du signal, commande linéaire quadratique
 - Réorientation du cursus informatique en 1999 avec l’implication de chercheurs du CMA notamment
 - Suivi des enseignements, des chargés de cours, des conférenciers; gestion de l’équipe pédagogique.
 - Animation des comités pédagogiques de l’ISIA, de l’évolution du cursus
 - Participation aux jurys de recrutement
- *Responsable des relations internationales* :
 - mise en place de partenariats européens et nord-américain de l’ISIA (de Septembre 1993 à Septembre 2000) :
 - Constitution d’un réseau de contacts et partenaires européens dans différentes Ecoles et Universités Européenne du réseau CESAER en vu
 - d’accueillir des étudiants européens au sein de la formation ISIA
 - d’organiser les stages ISIA dans les pays européens
 - d’inviter des professeurs et des conférenciers européens à intervenir à l’ISIA
 - Prospection de stages en Amérique du Nord et au Canada pour l’ISIA
 - Etablissement d’une collaboration avec l’Ecole Polytechnique de Montreal : organisation d’un stage ISIA dans le cadre de la chaire NORANDA du laboratoire de Robotique de P. Cohen (1996)
 - Démarchage dans la Silicon Valley en Février 2000 : montage de 3 stages (Monterey design, Ensim)
 - Organisation des voyages de promotion dans la Silicon Valley : visite de Stanford, Berkeley EECS, Ensim, Synopsys, Cadence, Monterey design, Sprint labs, Apple,

Mes enseignements

L'ensemble des enseignements auxquels je participe aujourd'hui sont principalement des enseignements que j'ai créés afin de pallier au manque de proposition sur les disciplines à la charnière entre sciences fondamentales et sciences économiques et sociales afin de traiter des grands enjeux liés au développement durable.

Ces enseignements ont un caractère original et s'appuient sur la synthèse que j'ai pu réaliser au cours de ces dix dernières années de ces différents domaines. Ils ont pour objectif d'ouvrir les élèves à l'intérêt de déployer des analyses basées sur des approches mathématiques issues de l'optimisation dans différents domaines essentiels tels l'énergie, les questions climatiques.

Pour exemple, voici le descriptif du premier enseignement de la liste exhaustive qui suit, que j'ai créé en 2009 à destination des élèves de troisième année de MINES ParisTech et que j'ai décliné dans différentes autres institutions depuis, sous forme plus concentrée.

Modélisation Prospective : principes et usages des modèles mathématiques pour l'évaluation des politiques de lutte contre le changement climatique

Domaines : Mathématiques. Economie.

Pré-requis : recherche opérationnelle et/ou optimisation

Objectifs du cours :

Sous l'aiguillon de la question climatique et de la globalisation économique, la modélisation prospective, tradition - un temps oubliée - liant prospective numérique, calcul économique, économie publique et réflexion stratégique, est aujourd'hui largement réinvestie dans le cadre des négociations internationales autour du dossier climatique.

L'objectif de cet enseignement est de présenter les outils de modélisation prospective, nés dans les années 60, du dialogue entre mathématiciens et économistes, et reposant sur un concept d'optimalité. On reviendra sur l'histoire de la contribution des modèles de prospective long terme face au questionnement climatique. D'autre part, on décryptera l'apport des mathématiques dans le cadre de la modélisation prospective en déclinant les modèles dans leurs croisements disciplinaires : mathématique et économie. A travers des cas concrets, on illustrera pourquoi ces outils - mettant en jeu des compétences en mathématiques appliquées et en sciences économiques - sont devenus le support incontournable et essentiel de la réflexion prospective pour l'évaluation des politiques de lutte contre le changement climatique.

Au delà, cet enseignement a pour vocation

- d'aborder les modèles mathématiques sous un autre angle en illustrant le rôle de la modélisation mathématique et de l'optimisation pour des questions "a priori" sans mathématiques ;
- de préparer aux débats sur le changement climatique en donnant un éclairage sur des outils de modélisation disponibles ;
- de se confronter aux difficultés de la modélisation dans un cadre dynamique complexe, celui du changement climatique, où le facteur humain est central.

Programme :

1. Prospective et histoire des modèles : La démarche prospective, Prospective et planification stratégique, Naissance d'une modélisation du long terme.
2. Les modèles prospectifs : Le cadre théorique de la modélisation, Les évolutions du besoin de modélisation, Classification des modèles.
3. Concept d'optimalité et Contributions de l'optimisation et du contrôle : Modèle DICE, croissance optimale et principe de Pontryaguine ; Modèle TIMES, allocation d'activités et programmation linéaire.
4. Usage des modèles prospectifs : Les exercices prospectifs relatifs au climat : politiques, régulations taxes/quantités, Analyse de sensibilité (scénarios, taux d'actualisation, données exogènes).
5. Pratique d'un modèle prospectif : Une question liée aux engagements internationaux sera éclairée, par exemple choisie parmi l'une des suivantes : La France face à ses engagements de réduction des émissions : division par 4 à l'horizon 2050 ou règle des 3x20 à l'horizon 2020 (20% de réduction des émissions de CO_2 , 20% de réduction de la consommation en énergie primaire, 20% d'énergies renouvelables dans la consommation finale) ou encore l'impact du passage d'un objectif de 20% à 30% de réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2020 pour l'Europe suite aux négociations de Copenhague.

Modalités d'évaluation :

Un exercice de prospective sur une question à définir avec les élèves sera proposé en première séance. Une restitution orale sera réalisée en dernière séance de l'exercice devant un jury d'experts. Suivant leur qualité, les travaux sont sujets à publication.

Liste des enseignements

1. Responsable et chargée de l'Enseignement spécialisé de 3ème année de l'Ecole des Mines de Paris, *Modélisation Prospective : principes et usages des modèles mathématiques pour l'évaluation des politiques de lutte contre le changement climatique* 15h
2. Chargée du cours de Programmation mathématique du mastère spécialisé OSE depuis 2000 : (50h)
3. Co-responsable du module de 3ème année de l'Ecole des Mines de Nancy : *Analyse comparée des filières énergétiques. Stratégies énergétiques* : chargée d'enseignement (10h en 2ème et 3ème année).
4. Chargée de cours Modélisation prospective pour les enjeux de long terme, Master Economie du Développement Durable, de l'Environnement et de l'Energie (EDDEE) (depuis 2011), Ecole des Mines de Nancy (depuis 2008), Magistère Sonatrach/Sonelgaz (Alger) 2008, Ecole Centrale Lille 2007.
5. Chargée de cours dans le cadre du MIG (module d'intégration généraliste) Systèmes embarqués de l'EMP (1ère année cycle ingénieur) depuis 2003.
6. Chargée du cours d'Automatique et systèmes dynamiques linéaires (cycle spécialisé ISIA) (1995-2000).
7. Chargée de cours Applications de matlab pour l'automatique, l'identification, la robotique et l'optimisation (cycle spécialisé ISIA et mastère spécialisé OSE) depuis 1999.

-
8. Chargée de cours dans le cadre de l'enseignement de l'Automatique à l'ESSI (Ecole Supérieure en Sciences Informatiques) et à l'EMSE (Ecole Supérieure des Mines de Saint Etienne) (2ème année cycle ingénieur) (1995 à 1999).
 9. Chargée de cours dans l'option Mathématiques Appliquées de l'ENPC (Ecole des Ponts et Chaussées)(2003/2004).
 10. Chargée de cours dans le cadre de l'enseignement spécialisé de l'EMP : identification et régulation d'une boucle fluide (2ème/3ème année) (1996-2000).
 11. Chargée de travaux pratiques pour le cycle ingénieur civil de l'EMP dans le cadre du cours d'Automatique (1990-1993).
 12. Formation de chercheurs et d'enseignants
 - Ecole des Mines de Paris : Enseignement des logiciels scilab et matlab
 - Ecole d'été du CNRS à Villefranche sur mer : Mathématiques Appliquées à l'étude des systèmes écologiques
 - Mathématiques pour l'Industrie, IREM (Institut de Recherche sur l'Enseignement des Mathématiques), Université de Nice-Sophia Antipolis, Janvier 2005.
 13. Conception et encadrement de projets d'élèves
 - optimisation des systèmes (mastère spécialisé OSE) : gestion de la centrale énergie d'une aciérie via la résolution d'un problème de programmation linéaire
 - robotique (ISIA, MIG Systèmes embarqués)
 - langage C++ (ISIA), ampl (mastère spécialisé OSE)

Encadrement d'étudiants

Thèses soutenues

1. Gondia Seck, Thèse de doctorat MINES ParisTech, spécialité Economie et Finance (2012). Co-directeur de thèse : G. Guerassimoff.
2. Mathilde Drouineau, Modélisation prospective et analyse spatio-temporelle : intégration de la dynamique du réseau électrique, Thèse de doctorat MINES ParisTech, spécialité Contrôle Optimisation et Prospective, (2011). Co-directeur de thèse : V. Mazauric.
3. Christian Fisher, Contrôle multi-objectifs d'ordre réduit, Thèse de doctorat MINES ParisTech, spécialité Contrôle Optimisation et Prospective, (2011). Co-directeur de thèse : M. Bordier.
4. Jean-Michel Cayla, Les ménages sous la contrainte carbone, Thèse de doctorat MINES ParisTech, spécialité Economie et Finance, (2011).
5. Ahcène Djemaa, Thèse de doctorat MINES ParisTech, spécialité Economie et Finance (2009). Co-directeur de thèse : G. Guerassimoff.
6. Jan Neering, Optimisation du positionnement et Localisation de source acoustiques passives, Thèse de doctorat MINES ParisTech, spécialité Informatique Temps réel, Robotique et Automatique (2009).
7. Hatem Elloumi (Commande des plates formes avancées de simulation de conduite), Thèse de doctorat EMP spécialité Informatique Temps réel, Robotique et Automatique (2006). Co-directeur de thèse : M. Bordier.

-
8. Edi Assoumou (Markal, un modèle de planification énergétique dans le contexte français), Thèse de doctorat EMP spécialité Economie et Finance, (2006).
 9. Mehmet Dagdelen (Restitution du mouvement pour la plateforme de simulation de conduite ULTIMATE) , Thèse de doctorat ENSMP spécialité Informatique Temps réel, Robotique et Automatique (2005).
 10. Christian Dumbs, (Développement d'outils pour l'analyse des systèmes photovoltaïques diesel) Thèse de doctorat ENSMP spécialité Energétique (1999).

Thèses en cours

1. Salma Zouaoui, Thèse de doctorat MINES ParisTech spécialité Contrôle Optimisation et Prospective. Co-directrice de thèse : V. Roy. Soutenance prévue le 23 Juillet 2012.
2. Aurélie Dubreuil, Thèse de doctorat MINES ParisTech spécialité Contrôle Optimisation et Prospective, en cours (initiée en 2009). Co-directeur de thèse : E. Assoumou.
3. Ahmadou Thiam, Thèse de doctorat MINES ParisTech spécialité Contrôle Optimisation et Prospective, en cours (initiée en 2010). Co-directeur de thèse : M. Bordier.
4. Stéphanie Bouckaert, Thèse de doctorat MINES ParisTech spécialité Contrôle Optimisation et Prospective, en cours (initiée en 2010).
5. François Briens, Thèse de doctorat MINES ParisTech spécialité Contrôle Optimisation et Prospective, en cours (initiée en 2011).
6. Paul Hugues, Thèse de doctorat MINES ParisTech spécialité Contrôle Optimisation et Prospective, en cours (initiée en 2011). Co-directeur de thèse : E. Assoumou.

Autres encadrements

- Tutorat des Missions professionnelles des Elèves du mastère OSE (3 à 4 par an depuis 1999) des élèves de l'ISIA (de 1995 à 2001).
- Tuteur des stages de recherches de post doctorants et d'élèves de masters, d'élèves du cycle ingénieur civil de MINES ParisTech.
- Tuteur des élèves du cycle ingénieur civil pour l'Acte d'Entreprendre (AE) et animatrice de GEO (groupe d'échange et d'orientation pour l'AE).
- Tuteur de stages de Master 2 pour divers cycles : ESSI, Centrale Lyon, Sup'Aero, ENS-Cachan.

Participation à des jurys de thèse

En dehors des jury de MINES ParisTech depuis 2006 :

- Université Joseph Fourier de Grenoble.
- Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Ecole des Mines d'Albi.
- Université Catholique de Louvain.

Liste des publications

DÉPÔT DE BREVET Procédé d'estimation de la stabilité d'un système électrique.

Déposé le 2 décembre 2011 sous le numéro FR 11 61087.

Propriétaires : ARMINES/Schneider electric.

Inventeurs : N. Maïzi, M. Drouineau, V. Mazauric.

A. OUVRAGES, COORDINATION D'OUVRAGES ET CHAPITRES D'OUVRAGES

1. Smart grids : au-delà du concept, comment rendre les réseaux plus intelligents, Presses de l'Ecole des Mines Ed., (2012), (ISBN : 978-2-911256-93-6).
2. Eau et Energie : des destins croisés, Presses de l'Ecole des Mines Ed., (2010), (ISBN : 978-2-911256-41-7).
3. Carbone et Prospective, Presses de l'Ecole des Mines Ed., (2009), (ISBN : 978-2-911256-11-0).
4. Iles et Energie, un paysage de contrastes, Presses de l'Ecole des Mines Ed., (2008), (ISBN : 978-2-35671-011-6).
5. Electricity prices in a Game Theory Context, Bossy, M., Maïzi, N., Olsder, G.J., Pourtallier, O., and Tanré, Chapter 7 (pp. 135-159) in Dynamic Games, Theory and application, Kluwer Academic, A. Haurie, G. Zaccour Ed, Springer (2005).
6. N. Maïzi, A “relaxation” approach which allows Hankel approximation of some vibrating structures, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Volume 185, Springer-Verlag, Berlin, (1992).

B-1. REVUES INTERNATIONALES AVEC COMITÉ DE LECTURE

1. J.-M. Cayla, N. Maïzi, Which households will have to pay to reduce CO_2 emissions ? : Integrating behavior and heterogeneity into the TIMES-households model, submitted to Energy Policy. in revision.
2. S. Bouckaert, S. Selosse, A. Dubreuil, E. Assoumou, N. Maïzi, Analyzing water supply in future energy systems using the TIMES Integrated Assessment Model (TIAM-FR), The Journal on Systemics, Cybernetics and Informatics (JSCI), Volume 10 - Number 1 - Year 2012.
3. A. Dubreuil, E. Assoumou, S. Bouckaert, S. Selosse, Nadia Maïzi, Water modeling in an energy optimization framework - The water-scarce middle east context, Applied Energy 101, (2013), pp 268-279.

4. J.-M. Cayla, N. Maïzi, C. Marchand, "The Role of Income in Energy Consumption Behaviour : Evidence from French Households data", *Energy Policy*, Volume 39, Issue 12, December 2011, Pages 7874-7883.
5. E. Assoumou, N. Maïzi, "Carbon value dynamics for France : A key driver to support mitigation pledges at country scale", *Energy Policy*, Volume 39, Issue 7, July 2011, Pages 4325-4336.
6. M. Dagdelen, G. Reymond, A. Kemeny, M. Bordier and N. Maïzi, "Model-based predictive motion cueing strategy for vehicle driving simulators", *Control Engineering Practice*, Volume 17, Issue 9, September 2009, Pages 995-1003.
7. N. Maïzi and M. Bordier, "Optimal operational loads for distributed cogeneration power plants", *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 7, issue 1, 2007.
8. V. Mazauric and N. Maïzi, "A global approach of electromagnetism dedicated to further long-term planning," *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 7, issue 1, 2007.
9. N. Maïzi, L^∞ approximation of a parabolic system regarded as a delay system, *Systems and Control Letters* **6** (1994) 457-467.

B-2. CONFÉRENCES INTERNATIONALES AVEC COMITÉ DE LECTURE

1. Stéphanie Bouckaert, Mathilde Drouineau, Vincent Mazauric, Edi Assoumou and Nadia Maïzi, Smart Grids and Reliability of power supply : Demand response impact on future power mixes, to be presented in IEEE PowerTech conference, Towards carbon free society through smarter grids, Grenoble France, 16-20 June 2013.
2. V. Mazauric and N. Maïzi, Optimality principles for the sustainability of electrical systems : a thermodynamic approach, International Conference on Applied Energy, Suzhou, China, 5-8 July 2012.
3. A. Atayi, N. Maïzi, S. Selosse, A 80% carbon-free Europe in 2050, what impacts on the European electric generation technologies uses ?, International Conference on Carbon Reduction Technologies (Care Tech), Polish Jurassic Highland, Poland, 19-22 September 2011.
4. M. Thiboust, N. Maïzi, S. Selosse, V. Mazauric, Arbitrage between energy efficiency and carbon management, International Conference on Carbon Reduction Technologies (Care Tech), Polish Jurassic Highland, Poland, 19-22 September 2011.
5. S. Bouckaert, S. Selosse, A. Dubreuil, E. Assoumou, N. Maïzi Towards A Shared Optimum For Water And Energy Resources : A Focus On The Middle East Using The TIAM-FR Model, IEW Stanford, July 2011.
6. N. Maïzi, M. Drouineau, E. Assoumou, V. Mazauric, A TIMES Model Of The Reunion Island For Analysing The Reliability Of Electricity Supply, IEW Stanford, July 2011.
7. S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi, Climate Scenarios For Developing And Developed Countries : A Prospective Analysis With TIAM-FR, IEW Stanford, July 2011.
8. N. Forsell, S. Selosse, N. Maïzi, Insights on the Chinese climate agenda : technical challenges, IEW Stanford, July 2011.
9. A. Dubreuil, S. Bouckaert, S. Selosse, N. Maïzi, "Water-Energy Capital : sustainability implications through the implementation of water allocation in TIAM-FR energy

-
- model”, 6th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, UNESCO, Dubrovnik, Croatia, September 25-29, 2011.
10. S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi, ”Developed and developing countries perspectives of the climate policy based on the Copenhagen Accord : A long-term analysis with TIAM-FR”, 34th IAEE International Conference, ”Institutions, Efficiency and Evolving Energy Technologies”, Stockholm, June 19-23, 2011.
 11. S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi, ”Climate policy impact on energy system : a long-term analysis with the TIMES Integrated Assessment Model (TIAM-FR)”, 3rd International Symposium on Energy Engineering, Economics and Policy : EEEP 2011, Orlando, Florida, July 19-22, 2011.
 12. V. Mazauric, T.H. Pham, P.F. Wendling and N. Maïzi, ”Sustainable design in electrical engineering : A multi-scale approach”, IEEE InterMag Conference, 2011 Taipei, Taiwan.
 13. S. Zouaoui-Elloumi, J-P. Marmorat, V. Roy, N. Maïzi, ”Securing Harbors by modeling and classifying ships behaviors”, Proceedings of the 20th Behavior Representation in Modeling and Simulation (BRIMS) Conference, Utah, March 2011.
 14. S. Zouaoui-Elloumi, J-P. Marmorat, V. Roy, N. Maïzi, ”Modeling Ship Behavior based on Hidden Markov Models”, Proceedings of Signal Processing, Pattern Recognition, and Applications (SPPRA 2011), Innsbruck, Austria, Feb 2011.
 15. M. Drouineau, N. Maïzi, E. Assoumou and V. Mazauric, ”Flexibility and reliability in long-term planning exercises dedicated to the electricity sector”, XXIIe World Energy Congress, Montreal, Canada, September 12-16, 2010.
 16. S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi and V. Mazauric, ”Post-Kyoto policy implications on the energy system : A TIAM-FR long-term planning exercise”, XXIIe World Energy Congress, Montreal, Canada, September 12-16, 2010.
 17. Stéphanie Bouckaert, Sandrine Selosse, Aurélie Dubreuil, Edi Assoumou and Nadia Maïzi, ”Implementing water allocation in the TIAM-FR energy model”, 11th IAEE European Conference, ”Energy Economy, Policies and Supply Security : Surviving the Global Economic Crisis”, Vilnius, Lithuania, August 25-28, 2010.
 18. S. Selosse, E. Assoumou and N. Maïzi, ”Prospective analysis of post-Copenhagen climate policy : the plausibility of investments in carbon capture and storage”, 11th IAEE European Conference, ”Energy Economy, Policies and Supply Security : Surviving the Global Economic Crisis”, Vilnius, Lithuania, August 25-28, 2010.
 19. M. Drouineau, N. Maïzi, E. Assoumou and V. Mazauric, ”TIMES model for the Reunion Island : addressing reliability of electricity supply”, International Energy Workshop (IEW), Stockholm, Sweden, June 21-23, 2010.
 20. S. Selosse, E. Assoumou and N. Maïzi, ”CO2 mitigation targets and technological limits : Prospective analysis with the TIMES integrated assessment model (TIAM-FR)”, International Energy Workshop (IEW), Stockholm, Sweden, June 21-23, 2010.
 21. S. Selosse, E. Assoumou and N. Maïzi, ”Regional impacts of the global carbon stakes : Long term prospective with the TIMES integrated assessment model (TIAM-FR)”, 33rd IAEE International Conference ”The Future of Energy : Global Challenges, Diverse Solutions”, Rio de Janeiro, Brazil, June 6-9, 2010.
 22. M. Drouineau, V. Mazauric, N. Maïzi and E. Assoumou, ”The cost of reliability of supply in future power systems”, 33rd IAEE International Conference ”The Future of Energy : Global Challenges, Diverse Solutions”, Rio de Janeiro, Brazil, June 6-9, 2010.

23. M. Drouineau, N. Maïzi, V. Mazauric and E. Assoumou, "Long term planning tools and reliability needs : focusing on the Reunion Island", 33rd IAEE International Conference "The Future of Energy : Global Challenges, Diverse Solutions", Rio de Janeiro, Brazil, June 6-9, 2010.
24. G. Guerassimoff, E. Assoumou, N. Maïzi, Biomass for energy uses : methodology and results for France, 33rd IAEE International Conference "The Future of Energy : Global Challenges, Diverse Solutions", Rio de Janeiro, Brazil, June 6-9, 2010.
25. V. Mazauric, N. Maïzi, L. Rondot, and P. Wendling, "Dissipative processes in electrical engineering : A multi-scale approach," presented at the 14th biennial IEEE Conference on electromagnetic field computation (CEFC 2010), Chicago, IL, USA, 2010.
26. N. Maïzi, V. Mazauric, E. Assoumou, and M. Drouineau, "Long-term planning and the sustainable power system : A focus on the flexibility needs and network reliability," IEEE PES Power Systems Conference and Exhibition, Seattle, WA, USA, 2009.
27. V. Mazauric, N. Maïzi, A. Anglade, and G. Guerassimoff, "Desperately seeking energy efficiency... using Information and Communication Technologies?," IEEE PES Power Systems Conference and Exhibition, Seattle, WA, USA, 2009.
28. Edi Assoumou, Valérie Roy and Nadia Maïzi, "Shift from oil fueled cars for future sustainable mobilities", 10th IAEE European Conference "Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies", Vienna, Austria, September 7-10, 2009.
29. Gilles Guerassimoff, Edi Assoumou, Nadia Maïzi and Marc Bordier, "Biomass for energy uses : assessment methodology for France", 10th IAEE European Conference "Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies", Vienna, Austria, September 7-10, 2009.
30. Sandrine Selosse, Edi Assoumou, Nadia Maïzi and Benoît Lentz, "GHG mitigation targets by 2020 : what international coordination?", 10th IAEE European Conference "Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies", Vienna, Austria, September 7-10, 2009.
31. M. Drouineau, N. Maïzi, E. Assoumou, and V. Mazauric, "Reliability in future electricity mixes : The question of distributed and renewables sources," 10th European International Association for Energy Economics Conference, Vienna, Austria, 2009.
32. Olivier Davidau, Mireille Bossy, Nadia Maïzi and Odile Pourtallier, "Valuing CO_2 Emission Allowances with Stochastic Control", ERCIM News, 2009, 78, 2009.
33. N. Maïzi, E. Assoumou, "Electricity Generation and Renewables Under Carbon Mitigation Policies", IEEE Energy 2030 : IEEE Conference on Global Sustainable Energy Infrastructure, Atlanta Nov. 2008.
34. A-S. Malidin, C. Kayser-Bril, N. Maïzi, E. Assoumou, V. Mazauric, V. Boutin, "Assessing the Impact of Smart Building Techniques : a Prospective Study for France", IEEE Energy 2030 : IEEE Conference on Global Sustainable Energy Infrastructure, , Atlanta Nov. 2008.
35. M. Drouineau, V. Mazauric, E. Assoumou and N. Maïzi, "Network reliability assessment towards long term planning", IEEE Energy 2030 : IEEE Conference on Global Sustainable Energy Infrastructure, Atlanta Nov. 2008.
36. C. Kayser-Bril, C. Liotard, N. Maïzi, V. Mazauric, "Power Grids on Islands : from Dependency to Sustainability?", IEEE Energy 2030 : IEEE Conference on Global Sustainable Energy Infrastructure, Atlanta Nov. 2008.

-
37. E. Assoumou, N. Maïzi, "Assessing Carbon Values To Achieve Strong Post Kyoto CO₂ Reduction Targets For France", presented at 31th International Association for Energy Economics International Conference, IAEE, Istanbul, Turkey, 2008.
 38. N. Maïzi, E. Assoumou, V. Mazauric, "Energy Efficiency And The "triple 20" European Policy : Lessons Drawn From The French Case", presented at 31th International Association for Energy Economics International Conference, IAEE, Istanbul, Turkey, 2008.
 39. Vincent Mazauric and Nadia Maïzi "An optimal approach dedicated to energy efficiency of electrical systems", EngOpt 2008 - International Conference on Engineering Optimization, Rio de Janeiro, Brazil, 01 - 05 June 2008.
 40. Vincent Mazauric, Nadia Maïzi and Philippe Wendling "A Global Approach of Electromagnetism Dedicated to Energy Efficiency" International Power Engineering Conference IPEC2007 - Dec 2007, Singapore.
 41. H. Elloumi, M. Bordier, N. Maïzi, "Existence and Boundedness of Solutions of Nonlinear non Symmetric Riccati Equations and their Application in Robust Control", 46th IEEE Conference on Decision and Control, New-Orleans, 12-14 Dec 2007.
 42. H. Elloumi, M. Bordier, N. Maïzi, "Maximum Performance of Motion Restitution in Advanced Driving Simulators", IROS 2007.
 43. H. Elloumi, M. Bordier, N. Maïzi, "Hybrid motion cueing algorithms for redundant advanced driving simulators", ICINCO, Angers, May, 9-12, 2007.
 44. Jan Neering, Marc Bordier and Nadia Maïzi, "Optimal Passive Source Localization", International Conference on Sensor Technologies and Applications SENSORCOMM 2007, Valencia, Oct. 2007.
 45. Vincent Mazauric, Nadia Maïzi, "Dedicating electrical engineering to energy efficiency", International Energy Workshop, Stanford, June 25-27, 2007.
 46. Vincent Mazauric, Nadia Maïzi, G. Guerassimoff, A. Anglade, "Desperatly seeking for energy efficiency using Information and Communication Technologies?" International Energy Workshop, Stanford, June, 25-27, 2007.
 47. Edi Assoumou, Felipe Pritchard, Gilles Guerassimoff, Nadia Maïzi, "Prospective analysis for the Chilean power generation park using Markal" International Energy Workshop, Stanford, June, 25-27, 2007.
 48. Vincent Mazauric, Jean-Paul Gonnet, Nadia Maïzi, Philippe Wendling, "Dedicating electrical engineering to electromagnetic compatibility and energy efficiency", Power Systems Conference and Exposition, Atlanta 29 Oct - 01 Nov 2006.
 49. Nadia Maïzi, Edi Assoumou, Marc Bordier, Gilles Guerassimoff, Vincent Mazauric " Key features of the electricity production sector through long-term planning : the French case", Power Systems Conference and Exposition, Atlanta 29 Oct - 01 Nov 2006.
 50. J.-P. Gonnet, J.-M. Guichon, A. Anglade, N. Maïzi, V. Mazauric, J. Roudet, and P. Wendling, "Toward a global approach dedicated to electromagnetic compatibility and energy efficiency" (invited speaker), presented at EMC-Zurich Conference, Singapore, 2006.

51. Jan Neering, Rémi Draï, Marc Bordier, Nadia Maïzi, "Multiobjective Robust Control Via Youla Parametrization", CCA, ISIC and CACSD 2006, October 4-6, 2006, Munich, Germany.
52. Edi Assoumou, Marc Bordier, Gilles Guerassimoff, Nadia Maïzi, "Reducing greenhouse gas emissions by a factor of 4 by 2050 : a bottom-up analysis of post Kyoto emissions targets for France ", International Energy Workshop, Cape-Town 27-29 June 2006.
53. J.-P. Gonnet, V. Mazauric, N. Maïzi, and P. Wendling, "A global approach dedicated to EMC and energy efficiency," presented at Biennial IEEE Conference on electromagnetic field computation (CEFC 2006), Miami, USA, 2006.
54. H. Elloumi, M. Bordier, N. Maïzi, "An encompassing formalization of robust computed torque schemes of robot systems", Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, December 2005, Sevilla, Spain.
55. H. Elloumi, M. Bordier, N. Maïzi, "An optimal control scheme for a driving simulator", Proceedings of ICINCO 2005, International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, September, 2005, Barcelona, Spain.
56. H. Elloumi, M. Bordier, N. Maïzi, "Integrated model-based control with human perception models in driving simulation", Proceedings of IMACS05, Calcul Scientifique, Mathématiques Appliquées et Simulation, July, 2005, Paris.
57. V. Roy, N. Maïzi, "Towards an integrated conception of hybrid dynamical systems", Proceedings of IFAC Barcelona, July 2002.
58. Nadia Maïzi, Valérie Roy, "Application of an Hybrid ESTEREL/LUSTRE/SIMULINK System : a Hybrid Energy System", Proceedings ADPM'2000, Sept 2000, Dortmund.
59. M. Bordier, N. Maïzi, An issue around the active control of sound, Proceedings *European Control Conference, Roma, Sept. 1995*.

B-3. CONFÉRENCES INVITÉES INTERNATIONALES

1. N. Maïzi, Smart, Sustainable and Low-Carbon growth of electricity systems, European Side Event organized by France and ParisTech Chair Modeling for sustainable development. COP 18, Doha, Qatar, December 2012.
2. A. Wacziarg, N. Maïzi, P. Pourouchottamin "Looking Japan energy future after the 11th March 2011's earthquake", 25th European Conference on Operational Research, EURO XXV, Vilnius, Latvia, July 8-11, 2012.
3. N. Maïzi, E. Assoumou, V. Mazauric, "Future challenges for the French power generation paradigm", 25th European Conference on Operational Research, EURO XXV, Vilnius, Latvia, July 8-11, 2012.
4. P. Hugues, E. Assoumou, N. Maïzi, "GHG emissions cap impact on French biofuel mix using MARKAL/TIMES Model", 25th European Conference on Operational Research, EURO XXV, Vilnius, Latvia, July 8-11, 2012.
5. S. Bouckaert, E. Assoumou, N. Maïzi, "Smart grids and prospective modeling for the electricity sector", 25th European Conference on Operational Research, EURO XXV, Vilnius, Latvia, July 8-11, 2012.

-
6. N. Maïzi Planning tools in the climate debate and business opportunities, Side Event long term prospective of business contribution to low carbon development joint Side Event organized by ICC and ParisTech Chair Modeling for sustainable development. COP 17, Durban, South Africa, December 2011.
 7. N. Maïzi, M. Drouineau, E. Assoumou et V. Mazauric, Reliability versus low carbon issues. Third Annual Meeting of the International Research Network for Low Carbon Societies (LCS-RNet), Paris, France, October 2011.
 8. M. Drouineau, N. Maïzi and V. Mazauric, "Optimization of future power systems focusing on reliability of supply, 2nd International Conference on Engineering Optimization (ENGOPT), Lisbon, Portugal, September 6-9, 2010.
 9. Nadia Maïzi, Marc Bordier, Ahmadou Thiam, "Optimal operation and sizing of a set of cogenerations", 2nd International Conference on Engineering Optimization (ENGOPT), Lisbon, Portugal, September 6-9, 2010.
 10. Nadia Maïzi, Sandrine Seloisse and Edi Assoumou, "Power generation under post Copenhagen emission reduction pledges", 2nd International Conference on Engineering Optimization (ENGOPT), Lisbon, Portugal, September 6-9, 2010.
 11. E. Assoumou, G. Guerassimoff, S. Seloisse and N. Maïzi, "ETSAP modeling tools : a bottom-up framework for energy issues", 24th European Conference on Operational Research, EURO XXIV, Lisbon, Portugal, July 11-14, 2010.
 12. M. Drouineau, N. Maïzi and V. Mazauric, "Optimization of future power systems focusing on reliability of supply", 24th European Conference on Operational Research, EURO XXIV, Lisbon, Portugal, July 11-14, 2010.
 13. V. Mazauric, M. Drouineau, N. Maïzi, "Energy transmission in electrical engineering : A multiscale approach", 24th European Conference on Operational Research, EURO XXIV, Lisbon, Portugal, July 11-14, 2010.
 14. S. Seloisse, E. Assoumou, N. Maïzi, "Regional impacts of post Copenhagen emission reduction pledges using TIAM-FR", 24th European Conference on Operational Research, EURO XXIV, Lisbon, Portugal, July 11-14, 2010.
 15. N. Maïzi, S. Seloisse, E. Assoumou, "From announced targets to local circumstances : Europe versus France", ParisTech side event COP15 (Copenhagen Climate Change Conference), Dec 2009.
 16. N. Maïzi, "Energy efficiency through Long term planning", RTCC side event COP13 UNFCCC (United nations Framework Convention on Climate Change Conference), Bali, 2007.
 17. Vincent Mazauric, Nadia Maïzi, Gérard Meunier, Philippe Wendling, Marc Vilcot, "Energy efficiency and eco-design : Major Issues for Schneider Electric (invited speaker) : presented at United nations Framework Convention on Climate Change Conference, Nairobi, Kenya, 2006.
 18. Nadia Maïzi Scientific computing helping energy efficiency, Invited session, Eden 2nd international workshop on Energy Awareness and Innovation, Oct 2005, Sophia-Antipolis.
 19. Nadia Maïzi Assertion of the energy risk, Invited session, Eden 1st international workshop on Energy Awareness and Innovation, Oct 2004, Sophia-Antipolis.
 20. Nadia Maïzi "A la croisée de l'économie, l'énergie, l'aide à la décision : une approche prospective du secteur de la production d'électricité en France" Conférence d'Ouverture

1ères Journées ATSB-ATTNA : Entre spécialisation et interdisciplinarité, Hammamet 2-3 Décembre 2006.

21. Nadia Maïzi, "Impact on future investments in the electricity production sector : The French paradigm ", Invited Speaker, Seventh International Symposium on Electric and Magnetic Fields, Aussois(France), 19-22 June 2006.
22. Nadia Maïzi, Robust Joint Torque Control using Variable Structure Control, *Ecole Polytechnique de Montréal, Nov 95*.

B-4. COMMUNICATIONS INTERNATIONALES

1. Ahmadou Thiam, Nadia Maïzi, Marc Bordier, Optimality of a grid connected cogeneration park : an equivalent decomposition scheme, to be presented at 7th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 2011), July 2011, Vancouver.
2. V. Mazauric, L. Rondot, N. Maïzi, An Energy-Based Error Criterion for Transient Electrodynamical Applications, to be presented at 7th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 2011), July 2011, Vancouver.
3. N. Maïzi, M. Bossy, O. Pourtallier, R. Carmona, Carbon Allowances and Electricity Prices : a Game-theory Approach, to be presented at 7th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 2011), July 2011, Vancouver.
4. J.M. Cayla, N. Maïzi, "Households under carbon constraint : What policies for a pathway toward low-carbon consumption in France ?", ETSAP Workshop, Stanford, July 2011.
5. Aurélie Dubreuil, Stéphanie Bouckaert, Sandrine Selosse, Edi Assoumou and Nadia Maïzi, Implementing water allocation in the TIAM-FR energy model, International Conference "Water and Energy", International Water Association and Waternetwerk, Amsterdam, The Netherlands, November 10-12, 2010.
6. Stéphanie Bouckaert, Sandrine Selosse, Aurélie Dubreuil, Edi Assoumou and Nadia Maïzi, "Implementing water allocation in the TIAM-FR energy model", ETSAP Workshop, Cork, November 2010.
7. J.M. Cayla, N. Maïzi, "Households under carbon constraint :TIMES model of French Residential and Transports sectors", ETSAP Workshop, Stockholm, June 2010.
8. G. Guerassimoff, E. Assoumou, N. Maïzi, "Biomass for energy uses : methodology and results for France", Joint TERI ETSAP Workshop, "Energy Modelling Tools and Techniques to address Sustainable Development and Climate Change, New Delhi, January 21-22, 2010
9. S. Selosse, N. Maïzi, E. Assoumou, "Regional impacts of the global carbon stakes : long term prospective with TIAM-FR", Joint TERI ETSAP Workshop, "Energy Modelling Tools and Techniques to address Sustainable Development and Climate Change, New Delhi, January 21-22, 2010.
10. Marc Bordier and Nadia Maïzi, "Marginal costs and Optimality for cogeneration systems", 23rd Conference on Operational Research, EURO XXIII, Bonn, Germany, July 5-8, 2009.
11. Olivier Davidau, Mireille Bossy, Nadia Maïzi and Odile Pourtallier, "Indifference prices for CO₂ emission allowances", 23rd Conference on Operational Research, EURO XXIII, Bonn, Germany, July 5-8, 2009.

-
12. M. Drouineau, V. Mazauric, and N. Maïzi, "Minimizing electrical losses in long-term power planning," presented at 23rd European Conference on Operational Research, EURO XXIII, Bonn, Germany, 2009.
 13. Jean-Michel Cayla, Nadia Maïzi, Christophe Marchand and Edi Assoumou, "Households under carbon constraints and the burden sharing issue", International Energy Workshop, Fondazione Giorgio Cini, Venice, Italy, June 15-17, 2009.
 14. Nadia Maïzi "Electricity Generation and renewables under carbon mitigation policies", Semi-annual Workshop, Sophia-Antipolis, France, 15-17 December 2008.
 15. Nadia Maïzi, Marc Bordier, "Optimal operation mode for distributed cogeneration power plants" presented at 6th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 2007), July 2007, Zurich.
 16. Vincent Mazauric, Nadia Maïzi, "A global approach of electromagnetism dedicated to further long-term planning" presented at 6th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 2007), July 2007, Zurich.
 17. Nadia Maïzi, Edi Assoumou, Marc Bordier, Gilles Guerassimoff "Markal-Times assessment of long term CO₂ emissions targets for France", European Conference on Operational Research EURO XXII, Prague 8-11 July 2007.
 18. Vincent Mazauric, Nadia Maïzi "Integrating network dynamics into long-term planning exercises", European Conference on Operational Research EURO XXII, Prague 8-11 July 2007.
 19. C. Durville, M. Bossy, N. Maïzi, O. Pourtallier, D. Varone, "Optimal dynamic cross-pricing of CO₂ market by indifference price", European Conference on Operational Research EURO XXII, Prague 8-11 July 2007.
 20. A. Djemaa, A. Hita, G. Guerassimoff, N. Maïzi "Modeling Energy Saving Potential In Industry, Case of the European Steel industry", Ecole d'automne Infratain, Infrastructure Regulation Modeling, and Policy, Berlin 1-6 Octobre 2007.
 21. A Djemaa, A Hita, G. Guerassimoff, N. Maïzi "Modeling Energy Saving Potential in Industry", Ecole d'été de l'ecee (The European Council for an Energy Efficient Economy), 6-9 juin 2007.
 22. Nadia Maïzi, Edi Assoumou, Marc Bordier, Gilles Guerassimoff, Vincent Mazauric "Energy mix planning for the French electricity production sector ", European Conference on Operational Research Euro2006, Reykjavik 2-5 July 2006.
 23. Vincent Mazauric, Philippe Wendling, Nadia Maïzi, "Variational formulation of electromagnetism dedicated to Energy Efficiency", 21st European Conference on Operational Research, July 2-5, 2006, Reykjavik, Iceland.
 24. E. Assoumou, N. Maïzi, M. Bordier, G. Guerassimoff, "Long-term Energy modeling for the french electricity sector", ETSAP meeting, Nov 2004, Firenze.
 25. M. Dagdelen, G. Reymond, A. Kemeny, M. Bordier, N. Maïzi, "MPC based Motion Cueing Algorithm : Development and Application to the ULTIMATE Driving Simulator", Proceedings of Driving Simulation Conference, Sept 2004, Paris.
 26. C. Dumbs, N. Maïzi, F.P. Neirac, D. Mayer, Sizing and Optimized Control of PV-diesel hybrid energy systems. Design and performance analysis, 2ème congrès mondial sur l'énergie solaire photovoltaïque, Vienne, 6-10 July 1998.

-
27. N. Maïzi, S. Buresi, O. Khatib, Robust Joint Torque Control using Variable Structure Control, *Séminaire présenté à l'Ecole Polytechnique de Montréal, Nov 95*.

C-1. REVUES NATIONALES AVEC COMITÉ DE LECTURE

1. N. Maïzi, V. Mazauric, "Penser le long terme du secteur électrique pour réussir son efficacité énergétique," Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle, vol. 64, pp. 57-60, 2011.
2. V. Mazauric, N. Maïzi, "Réussir l'efficacité énergétique du vecteur électrique : Enjeux, méthodologie, éco-conception, solutions, prospective," Revue d'Electricité et d'Electronique, vol. 5, pp. 111-119, 2008.
3. Nadia Maïzi, Edi Assoumou, "Modélisation prospective et spécificités de la politique énergétique française", J3eA 6, (2007).
4. Edi Assoumou, Marc Bordier, Gilles Guerassimoff, Cédric Grange, Nadia Maïzi " La famille MARKAL de modèles de planification énergétique : un complément aux exercices de modélisation dans le contexte français ", Revue de l'énergie 558, Juillet - Août 2004.
5. Utilisation des langages réactifs synchrones pour la simulation d'un système multi-énergies, V. Roy, N. Maïzi, *Revue de l'électricité et de l'électronique*, N. 10, nov 2000.
6. A. Le Mouel, F. Neirac et N. Maïzi, Application d'une méthode de Réduction Hankel-optimale à la solution de l'Equation de la Chaleur, *Revue Générale de Thermique Française*, n° 389, Mai 1994, 336-344.
7. V. Roy, N. Maïzi, Utilisation des langages réactifs synchrones pour la simulation d'un système multi-énergies, *Revue de l'électricité et de l'électronique*, N. 10, nov 2000.
8. N. Maïzi, Réduction au sens de la norme de Hankel de modèles dynamiques de dimension infinie, *Thèse soutenue à l'Ecole des Mines de Paris*, 1992.

C-2. CONFÉRENCES INVITÉES NATIONALES

1. N. Maïzi, Scénarios de transition énergétique, Séminaire de l'Académie des Technologies, 15 Janvier 2013.
2. N. Maïzi, Du bon usage des scénarios pour l'exercice de prospective long terme : ou comment élaborer une transition énergétique intelligente en France, " Regards croisés d'économistes, de parlementaires et de l'Administration sur la politique énergétique de la France et de l'UE : Quels scénarios et comment s'en servir ? ", Association des Economistes de l'Energie, 14 Novembre 2012.
3. N. Maïzi, Enjeux d'une prospective long terme : Smart grids et Smart Cities, Journées Mines Telecom, 13 Novembre 2012.
4. N. Maïzi, L'exercice prospectif et la fabrique de scénarios énergétiques : réflexion sur les approches 2050 pour la France, Séminaire " Prospective et scénarios énergétiques ", Fondation Tuck, 18 Octobre 2012.
5. N. Maïzi, Contraintes technologiques : conditions techniques d'une transition énergétique intelligente, Conférence plénière de la 4ème Journée de la Chaire ParisTech MPDD, "Enjeux Energie-Climat", MINES ParisTech, 3 Octobre 2012.

-
6. N. Maïzi, Modèles du long terme et paradigme optimal, Séminaire " Modèles : outil de prospectives et de convergence interdisciplinaire ", Paris-Diderot, 12 Juin 2012.
 7. N. Maïzi, Les outils de la prospective long terme pour le business et l'efficacité énergétique, Conférence introductive de la Journée "Smart cities et prospective : une contribution à RIO+20", Schneider Electric, Rueil-Malmaison, 4 Juin 2012.
 8. N. Maïzi, Scénarios post-nucléaires : éléments de cadrage. Journée de la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable "Post Fukushima", Paris, 11 octobre 2011.
 9. N. Maïzi, Penser le long terme du secteur électrique. Exposé d'ouverture Concordat GENELEC Janvier 2011.
 10. Nadia Maïzi, Jean-Charles Hourcade, Les objectifs post Copenhague des pays émergents : regards croisés de scénarios prospectifs de TIAM-FR et d'IMACLIM. Journée de la Chaire Modélisation Prospective. 17 Nov. 2010.
 11. N. Maïzi, Les modèles, outils de prospective dans le débat climatique. Décisions politiques et économiques face aux enjeux énergie-climat. Journée de l'Université TOTAL, 18 Février 2010.
 12. N. Maïzi, Conférence Modélisation prospective et politiques de lutte contre le changement climatique, Fête de la Science (2009).
 13. N. Maïzi, S. Selosse, G. Guerassimoff, Séminaire "Energie et Développement Durable", CERESUR, Université de la Réunion, 30 novembre 2009.
 14. N. Maïzi, E. Assoumou, MARKAL/Times-France : résultats des exercices prospectifs. Conseil d'Analyse Stratégique (6 interventions en 2007, 2 en 2009).
 15. N. Maïzi, E. Assoumou, Restitution des exercices de prospective France réalisés pour le CAS. Journées ADEME Prospective Bâtiment (18 Janvier 2008).
 16. N. Maïzi, Modélisation prospective et développement durable, Conseil scientifique de Schneider Electric (4 septembre 2007).
 17. N. Maïzi, E. Assoumou, M. Bordier, G. Guerassimoff, Une approche prospective utilisant le modèle MARKAL, Forum Interministériel sur la Prospective : Mars 2007.
 18. Nadia Maïzi, Edi Assoumou, "Exercices prospectifs via le modèle MARKAL : spécificités françaises?", Energie et développement durable, JEEA, Rennes, Mars 2007.
 19. V. Mazauric, N. Maïzi, "Réussir l'efficacité énergétique du génie électrique : Enjeux, méthodologies, (éco-)conception, solutions, prospective (invité)," Journée technique SEE : Eco-conception et méthodologies de conception, quelques exemples de pratiques en génie électrique, Paris, France, 2006.
 20. N. Maïzi, E. Assoumou, Prospective énergétique : Le modèle MARKAL, *Communication présentée à l'Observatoire de l'Energie, DGEMP*, 16 Mai 2005, Paris.
 21. N. Maïzi, "Mathématiques dans l'industrie : la simulation de conduite automobile", Séminaire IREM (Institut de Recherche sur l'Enseignement des Mathématiques), Université de Nice-Sophia Antipolis, Janvier 2005.
 22. N. Maïzi, La théorie des jeux dans le cadre du protocole de Kyoto, Séminaire Changement Climatique, Ecole des Mines de Paris, Février 2002.
 23. N. Maïzi, V. Roy, Intégration d'Esterel/Lustre/Simulink en vue de la conception des systèmes hybrides : Application à un système d'alimentation en électricité, *conférence invitée au GDR Systèmes hybrides*, 12 Janvier 2001, Paris.

-
24. Nadia Maïzi, *Anti son, Séminaire invité dans le cadre du projet SOSSO*, Inria Rocquencourt, Novembre 1996.

C-3. COMMUNICATIONS NATIONALES

1. N. Maïzi, E. Assoumou, Prospective scenarios for France in 2050, Les Cahiers de la Chaire, Working Paper n° 2012-07.
2. E. Assoumou, N. Maïzi, Analysis of the effect of environmental policies on the allocation of natural gas accross end-use sectors in France, Les Cahiers de la Chaire, Working Paper n° 2011-02.
3. M. Bossy, N. Maïzi, O. Pourtallier, L. Violeau, E. Assoumou, "Carbon pricing in the European carbon market context ; An indifference pricing approach" and "Valeur carbone et objectifs de réduction pour la France", séminaire ADEME/CMA, Février 2011.
4. S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi, "Engagements post COP 15 : Séquestration du carbone ou renouvelables ?", Colloque "L'énergie par ses externalités" organisé à l'occasion des 10 ans du Mastère OSE (Optimisation des Systèmes Energétiques), Ajaccio et Corte, Corse, 5-7 mai 2010.
5. Edi Assoumou, Gilles Guerassimoff, Nadia Maïzi, Marc Bordier, "Etudes de sensibilité pour la prospective électrique française l'aide du Modèle MARKAL ", 4ème colloque MONDER, Martigny (Suisse), 8-11 Janvier 2006.
6. Nadia Maïzi, Edi Assoumou, Marc Bordier, Gilles Guerassimoff, "Prospective énergétique : Le modèle MARKAL", présentation à la Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières, DGEMP 16 Mai 2005.
7. Nadia Maïzi, La question de l'énergie plurielle dans le grand sud est, pp 50-51, Prospective Rhône-Alpes-Méditerranée, Hors Série, Novembre 2004.
8. E. Assoumou, N. Maïzi, M. Bordier, G. Guerassimoff, Energies renouvelables et modélisation Markal, Workshop CREDEN/EMP "La promotion de l'électricité verte", Ecole des Mines de Paris, Juin 2004.
9. E. Assoumou, N. Maïzi, M. Bordier, G. Guerassimoff, Energies renouvelables et modélisation Markal, Workshop CREDEN/EMP "La promotion de l'électricité verte", Ecole des Mines de Paris, Juin 2004.
10. N. Maïzi, La théorie des jeux dans le cadre du protocole de Kyoto, Séminaire Changement Climatique, Ecole des Mines de Paris, Février 2002.

D. RAPPORTS DE RECHERCHE, RAPPORTS D'ETUDES, MÉMOIRES

1. M. Bossy, N. Maïzi, O. Pourtallier, Modélisation de la valeur carbone, rapport de recherches INRIA, 12/2012.
2. N. Maïzi, De la dimension infinie à la dimension prospective : variations autour du paradigme d'optimalité, Mémoire d'Habilitation à diriger les recherches, ED STIC 84, Juillet 2012.
3. N. Maïzi, E. Assoumou, Scénarios prospectifs France à l'horizon 2050, Rapport à la commission Besson "Energie 2050", Décembre 2011.

-
4. M. Bossy, N. Maïzi, O. Pourtallier, L. Violeau, E. Assoumou, "Carbon pricing in the European carbon market context ; An indifference pricing approach", Rapport de recherches, convention ADEME N0805 C 0098, Février 2011.
 5. M. Bossy, O. Davidau, N. Maïzi, O. Pourtallier, "Valeur Carbone", Rapport de recherches, convention ADEME N0805 C 0098, Décembre 2009.
 6. Améliorations de la modélisation Markal du secteur de l'électricité, E. Assoumou, M. Bordier, G. Guerassimoff, N. Maïzi, Rapport pour le Conseil Scientifique du Conseil Français de l'Energie, Aout 2005.
 7. Modélisation Markal électrique Europe : avancement, E. Assoumou, M. Bordier, G. Guerassimoff, N. Maïzi, Rapport pour le Conseil Scientifique du Conseil Français de l'Energie, Aout 2005.
 8. Using game theory for the electricity market, M. Bossy, N. Maïzi, G. J. Olsder, O. Pourtallier and E. Tanré (2004), Research Report INRIA RR-5274, 2004.
 9. Etat de l'art sur la modélisation l'analyse et la commande des systèmes dynamiques hybrides, CMA, Février 2004, Rapport HYBRISIM, PREDIT.
 10. Enjeux environnementaux et planification énergétique européenne, N. Maïzi, M. Bordier, E. Assoumou, G. Guerassimoff, Rapport pour le Conseil Scientifique du Conseil Français de l'Energie, Février 2004.
 11. Markal : Une application au secteur de la production électrique en France, N. Maïzi, M. Bordier, C. Grange, G. Guerassimoff, Rapport pour le Conseil Scientifique du Conseil Français de l'Energie, Février 2004.
 12. Anti son (II) : Expression du critère énergétique, Marc Bordier, Nadia Maïzi, *Rapport de Recherche EMP*, n° 30/96, Septembre 1996.
 13. N. Maïzi, Réduction au sens de la norme de Hankel de modèles dynamiques de dimension infinie, *Thèse présentée à l'EMP*, 1992.
 14. N. Maïzi, Réduction de modèle appliquée à une équation d'évolution de la chaleur, *Rapport de Recherche EMP*, n° 05/91, Avril 1991.

E. NOTES DE COURS

1. Programmation linéaire et applications énergétiques. Initiation à ampl, N. Maïzi, *Notes de cours mastère OSE*, Janvier 2001.
2. Notions d'Automatique Générale illustrées par `matlab`, N. Maïzi, *Notes de cours ISIA*, Janvier 1998.

Deuxième partie

DE LA DIMENSION INFINIE À LA DIMENSION PROSPECTIVE

variations autour du paradigme d'optimalité

Introduction

L’optimisation est un outil clef pour l’aide à la décision, pratiquée par les scientifiques, essentielle pour les décideurs.

Parfois il est important de résoudre un problème de manière optimale ; d’autres fois l’optimalité n’est pas le point crucial : soit parce qu’une solution presque optimale suffit, soit parce qu’il est difficile d’associer au problème réel un critère simple permettant de juger la solution. Cependant, même dans ces cas l’optimisation est utile car elle donne un moyen au modelleur de tester sa pensée. Si la solution “optimale” n’est pas envisageable, voire est ridicule alors ceci peut souligner le fait qu’il faut affiner le modèle et la réflexion autour, en respectant un principe de cohérence vis à vis du problème à traiter [14] car ”... la prudence, compagne naturelle de l’ignorance, peut parfois conduire à utiliser un critère amendé ou différent ¹”.

Dans ce mémoire, nous illustrerons comment nos recherches se déclinent dans ce cheminement où le concept d’optimalité permet d’offrir une grille de lecture aux problèmes réels et aux applications ouvertes que nous envisageons.

Nous reviendrons sur les travaux que nous avons mené ces dix dernières années, en les parcourant à la lumière de l’approche optimale que nous venons de souligner. Cela sera l’occasion de rappeler la difficile déclinaison du paradigme de l’optimalité lors de sa confrontation aux principes de réalité de systèmes toujours plus complexes.

Après avoir récapitulé l’expérience de recherche acquise à travers des contributions variées, qui nous ont mené de problèmes de contrôle en dimension infinie à des applications dans les domaines du spatial, de l’énergie et de l’automobile, nous nous arrêterons spécifiquement sur nos développements en matière de prospective long terme.

En particulier, nous argumenterons le credo que l’optimalité est un canevas nécessaire pour envisager les enjeux d’une modélisation du long terme, que nous proposerons comme centrale dans nos perspectives de recherche.

Mais fidèles à notre formation ”à la française” nous ne développerons notre réflexion sans être au préalable revenus sur les grands principes sous jacents à l’optimalité et leur liaison naturelle avec l’étude des systèmes dynamiques.

1. P. Massé, Le plan ou l’anti-hasard, p165 [48]

Chapitre 1

Retour sur le paradigme d’optimalité

Le paradigme d’optimalité : un concept mathématique

Le concept d’optimalité peut se décrire de façon extrêmement générique mathématiquement comme la recherche de l’argument x qui minimise un critère exprimé sous forme d’une fonction (ou plus généralement d’une forme) $J(x)$, soumis ou non à des contraintes d’égalité ou d’inégalité.

Toute la discussion dépend alors de la connaissance des espaces où évoluent l’argument x , le critère $J(x)$, et l’ensemble des contraintes associées. En effet, suivant les propriétés mathématiques de cette formulation générique, on peut parcourir les classes des problèmes d’optimisation associées, éventuellement établir l’existence voire l’unicité de la solution optimale et envisager la méthode de résolution la plus adaptée, plus ou moins explicite plus ou moins complexe.

L’attractivité de cette approche, outre l’usage que l’on en fera, réside dans l’écriture d’une histoire au cours de laquelle il a toujours été nécessaire d’établir un cercle vertueux entre la question réelle posée, sa modélisation, la formulation associée, sa résolution mathématique, le développement d’algorithmes adaptés et l’interprétation des résultats produits. Intrinsèquement le déploiement d’une approche optimale repose sur plusieurs disciplines : celles associées à la question réelle (problème économique, phénomène physique, ...), celles de la résolution (mathématiques), celles de la mise en oeuvre (informatique, algorithmique, complexité, ...), celles de l’interprétation (analyse de sensibilité, théorie de la dualité, ...).

Pour preuve nous reprendrons une brève description des principales classifications des problèmes d’optimalité.

Une première déclinaison statique

Parmi les caractéristiques importantes d’un problème d’optimisation, deux ont particulièrement structuré l’histoire de la programmation mathématique : le caractère statique et la propriété de linéarité, conduisant aux premiers grands résultats de cette discipline [20].

Lorsque l'on revisite l'histoire de la recherche opérationnelle, on retrouve l'essence du terme de *programmation* [48] introduit en 1940 dans le contexte de la planification ("scheduling or planning") d'activités¹ dans des grandes organisations (vision économique) et pour les opérations militaires, pour être finalement capté par les sciences informatiques.

La programmation, au sens de la planification, consiste à élaborer un programme qui permet de déterminer ce que sera la valeur d'une variable (dite de décision) représentant une quantité ou un niveau d'activité.

Ce programme est élaboré sous une forme qui décrit mathématiquement les restrictions inhérentes à la planification comme un ensemble d'équations ou d'inégalités impliquant ces variables. Une solution tenant compte de toutes ces contraintes sera considéré comme un *plan* acceptable.

Il est intéressant de noter à ce stade que l'expérience montre que modéliser une opération complexe simplement en spécifiant des contraintes peut déjà conduire aux écueils suivants :

- pas assez de contraintes (problème sous contraint) et il y a une infinité de solutions
- trop de contraintes et les solutions admissibles sont tellement restreintes qu'on risque de ne pas avoir de solution.

Il s'avère déterminant, pour contourner cette difficulté, de définir l'objectif du programme : une fonction dépendant des variables, exprimant un coût ou un profit, et qui permet de décider en quoi une solution est meilleure qu'une autre. Et retenir comme décision optimale celle qui minimise ou maximise le critère : c'est le champ d'investigation de la programmation mathématique.

La **programmation linéaire** concerne les problèmes pour lesquels la fonction objectif est linéaire et les contraintes d'égalité ou d'inégalité sont linéaires. Il existe un grand nombre de méthodes qui permettent de résoudre ces problèmes pour un grand nombre de variables et de contraintes, toutes nécessitant l'utilisation d'un ordinateur. A partir de 1940, ce domaine émerge alors que le développement des ordinateurs s'accompagne d'une informatique scientifique dédiée à ces sujets. L'algorithme du simplexe est le premier algorithme célèbre élaboré par Dantzig en 1946 qui s'améliora durant la décennie qui suivit [20]. Le développement des ordinateurs à la même époque répandit l'utilisation du terme de programmation dans son acception actuelle.

Bien qu'elle soit attractive, il est parfois non réaliste de conserver l'hypothèse de linéarité pour refléter la spécificité de la question optimale posée. Dans ce cas et si, soit le critère, soit les contraintes impliquent des fonctions non linéaires on parle de **programmation non linéaire**, classe de problème bien plus difficile à résoudre que la précédente si certaines propriétés comme la convexité viennent à manquer.

L'hypothèse de linéarité tombe également lorsque certaines variables doivent prendre des valeurs entière (en partie ou en totalité), reflétant la recherche de décisions en tout ou rien. On parle alors de **programmation entière** cas pour lequel une solution explicite est beaucoup plus difficile à établir car elle repose souvent sur la mise en oeuvre d'heuristiques. Cependant une combinaison de processeurs plus rapides et de méthodes plus sophistiquées ont fait progresser les méthodes adaptées ces dernières années [5]. Et paradoxalement, c'est l'implémentation informatique des méthodes de programmation linéaire, et la recherche de

1. plan de production, gestion de stocks, ...

leur complexité qui a été le moteur de développement des algorithmes de résolution des problèmes non linéaires. En 1979 Khachiyan [34] a prouvé qu'un *programme linéaire* (problème d'optimisation avec critère et contraintes linéaires) pouvait se résoudre en *temps polynomial*, résolvant ainsi une conjecture vieille de plusieurs dizaines d'années. Ce n'est qu'à la suite des travaux de Karmakar [33] sur les méthodes de points intérieurs en 1984, que les algorithmes polynomiaux se sont posés en compétiteurs de la méthode utilisée jusqu'alors, l'algorithme du *simplexe* de G.B. Dantzig [20], dont Klee et Minty [35] ont montré en 1972 qu'il n'est pas polynomial²

Les problèmes réels qui se formulent en programmes linéaires doivent remplir un certain nombre d'hypothèses adaptées à ce type de formulation mathématique :

- le contexte est déterministe,
- le temps est figé : on réalise un instantané³,
- les relations permettant de décrire le critère de décision et les contraintes sont linéaires.

Ceci revient à dire que l'emploi de tels outils est inséparable de l'examen attentif de la signification et de la validité de ces hypothèses.

Et quand le temps s'écoule ? La dynamique et l'aléa

Ce n'est pas le tout de savoir ce qu'il faut faire pour optimiser un coût ou un profit instantanément, on peut souhaiter constituer une suite de décision (discrète ou continue). L'optimisation au cours du temps peut alors être considérée comme une optimisation par "pallier ou étape". On doit trouver un compromis entre le désir d'obtenir le plus bas coût à l'instant présent, et l'incidence de ce choix sur l'élévation des coûts dans les étapes ultérieures. L'action appropriée est de sélectionner une décision qui minimise à la fois la somme des coûts induits à l'étape courante et le moindre coût total qui pourrait être induit lors des étapes suivantes, suite à cette décision. C'est le champ de la programmation dynamique, introduit dans les années 1950, reposant sur le **principe d'optimalité de Bellman** :

toute sous trajectoire d'une trajectoire optimale, reliant un noeud n quelconque de la trajectoire optimale et la fin du chemin, est optimale pour le sous problème cherchant à relier ce noeud n à la fin du chemin.

Imaginons qu'au fur et à mesure que les décisions sont prises, il faille tenir compte des informations qui arrivent. Suivant Gaston Berger, [48] il faut "compléter les projets établis à l'avance par de nouveaux projets inspirés par les circonstances". Ces informations qui arrivent sont inconnues, et cet aléa nécessite naturellement d'introduire une modélisation stochastique. Il s'agit alors de prendre une décision qui minimise la fonction (coût, de paiement) en tenant compte de l'aléa pour faire face comme envisagé depuis toujours dans l'aventure humaine [48] : "Nous savions que nous nous aventurons sur la mer la plus périlleuse, et qu'il

2. Le simplexe est exponentiel dans le pire des cas (en 2^n , lorsque n nombre de variables égale le nombre de contraintes m), mais en pratique, empiriquement il est proportionnel au nombre de contraintes du problème, c'est pourquoi son usage est si répandu.

3. L'idée sous jacente est que l'évolution dynamique du marché complexifie la prise de décision. Il y a alors nécessité de réaliser un "snapshot" à un moment donné de l'évolution dynamique. L'hypothèse importante est la suivante : on considère que la taille de l'entreprise est suffisamment petite pour que les décisions n'aient pas d'influence sur le marché et donc pas de répercussion sur la valeur des matériaux et le prix des produits.[67]

y avait dix à parier contre un que nous n'en échapperions pas. Pourtant nous nous sommes aventurés car le résultat espéré étouffait la crainte du péril probable.”⁴

Lorsque l'on réduit l'incertitude à la probabilité, un des paradigme pour optimiser en environnement incertain, en fonction d'événements imprévisibles, est l'espérance mathématique du coût (moyenne pondérée par la probabilité d'occurrence de chaque valeur du coût) :

$$E(J(u, v))$$

où u est la variable de décision, et v un aléa dont on fait un modèle probabiliste.

De tous temps, les domaines de l'énergie puis de la finance ont été les applications les plus prisées pour la déclinaison de la programmation dynamique ; les problèmes associés ont motivé les premières méthodes de résolution dédiées aux grands systèmes[21],[36] et qui font toujours l'objet d'intérêt de nos jours[13].

Ce qu'il faut retenir de cette vision dynamique est qu'elle peut être déclinée en deux visions duales : l'une purement combinatoire relève des **arbres de décision**, une représentation graphique qui permet de dérouler le temps en étapes successives ; l'autre conduisant à la résolution d'un problème authentiquement “dynamique” via l'équation d'**Hamilton Jacobi Bellman**.

Et il est élégant de partir de la vision combinatoire de la programmation dynamique pour aboutir à une formulation en système dynamique. Ainsi, examinons l'idée d'étapes successives lorsqu'elle est déclinée sous forme de graphe avec les notations suivantes :

les noeuds du graphe, appelés état, sont repérés par un numéro d'étape (ou instant) $k \in 0, 1, \dots, T$; l'état est l'endroit où l'on prend une décision ; pour chaque étape en cours k , X_k est l'ensemble des états possibles ;

l'hypothèse indique que les arcs relient toujours un état d'une étape à un état de l'étape suivante et cela dans le sens de parcours imposé du graphe ;

$u(k) \in U_k$ commande (ou contrôle) est dans la liste des décisions que l'on peut prendre à un instant k noté U_k ; les arcs issus d'un noeud $(k, x(k))$ où $x(k) \in X_k$ sont indicés par $u \in U_k = U(k, x(k))$ u pour la commande. u peut dépendre de l'état x . $U(k, x(k))$ est un ensemble dont le cardinal est le nombre d'arcs quittant le noeud $(k, x(k))$.

Le graphe définit une équation dynamique de la forme :

$$(1.1) \quad x(k+1) = f(k, x(k), u(k))$$

car à chaque noeud $(k, x(k))$ et chaque commande $u \in U(k, x(k))$, le graphe définit à quel noeud ou état conduit cet arc, état toujours situé à l'étape $k+1$.

Un chemin dans le graphe est une suite d'états $x(k), k = 0, \dots, N$ appelée trajectoire. Une trajectoire peut aussi être caractérisée par l'état initial $x(0)$ et une suite de commandes $u(k), k = 0, \dots, N-1$ qui engendre une trajectoire unique à travers l'équation dynamique.

4. W. Shakespeare, Henri IV, IIe partie acte I.

Notons encore $L(k, x, u)$ le “poids” ou la longueur (appelée encore coût) de l’arc issu du noeud (k, x) indicé par u . Pour tout noeud terminal, notons $K(x)$ le coût attaché à ce noeud. Alors le coût d’une trajectoire, qu’il s’agit de minimiser, est donné par :

$$(1.2) \quad J = K(x(N)) + \sum_{k=0}^{N-1} L(k, x(k), u(k))$$

Il y a équivalence complète entre le graphe structuré et une équation de la forme 1.1. Il y a donc équivalence complète entre un problème de plus court chemin dans un tel graphe et un problème de minimisation du critère J de 1.2 avec la dynamique décrite par 1.1.

La programmation dynamique doit son nom à cette interprétation : l’équation 1.1 est vue comme décrivant un système dynamique où k est interprété comme un temps.

L’équation 1.2 définit une fonctionnelle additive de la trajectoire. On recherche la commande et éventuellement l’état initial qui minimise ce critère ou coût.

Ainsi, dès lors que l’hypothèse est dynamique, on retrouve la théorie du contrôle que l’on peut considérer comme une optimisation dynamique au cours du temps [4]. Prenons pour exemple un système de chauffage dont la température de chauffe θ est régulée via une commande u . On cherche à suivre une température nominale donnée $x(t)$. Le critère peut indiquer : combien on est prêt à payer pour se rapprocher de la trajectoire nominale ; ou encore combien on consomme pour se rapprocher de la trajectoire nominale ; ou enfin, un compromis entre les deux rendu possible par un critère intégrant les variables d’état et de contrôle. Cela introduit, la **synthèse quadratique** très utile pour réaliser une régulation multivariable.

Ces questions contrastent avec le cadre des modèles à optimiser de la programmation linéaire qui sont statiques et ne présentent rien d’aléatoire ou de caché. C’est l’apparition de ces trois nouvelles caractéristiques (dynamique, évolution stochastique et observation imparfaite de l’état) qui donne naissance à de nouveaux types de problèmes d’optimisation, qui requièrent de nouveaux modes de pensée. Ils sont au centre de la théorie du contrôle, qui se préoccupe des systèmes dynamiques et de leur optimisation dans le temps. Cette approche peut également tenir compte du fait qu’un système dynamique peut évoluer stochastiquement et que les variables clefs peuvent être inconnues ou observées de façon imparfaite.

Il suffit de réfléchir par exemple à l’économie pensée comme un système à contrôler.

Contrôle et Optimisation

Si dans ce qui précède, il est apparu clairement que l’optimisation serait un canevas nécessaire pour bâtir la réflexion, les liens que nous avons exhibé entre optimisation et contrôle permettront de revenir sur notre propre cheminement. Car c’est d’abord des systèmes dynamiques qu’il fut question, et de la théorie du contrôle, même si toujours, et selon le principe des mathématiques appliquées, il s’agira de disposer d’une bonne métaphore de la réalité qui admette une solution numérique simple.

Chapitre 2

Des problèmes de contrôle, de leur formulation optimale et de la question du critère

Il est vrai qu'au commencement de mes travaux de recherche, la théorie des systèmes et le contrôle pouvaient occulter le caractère optimal : soit il s'agissait d'approcher une fonction de transfert par une fonction plus simple à manipuler, soit il fallait contrôler l'état pour garantir que son évolution respecte un certain nombre de propriétés. Pourtant, comme nous allons le voir à travers quelques exemples, une formulation optimale n'était jamais loin.

Approximation rationnelle pour la réduction de modèles de dimension infinie

Les méthodes de réduction des systèmes complexes étudiés au cours de mon travail de thèse [39] s'appuyaient sur l'hypothèse de l'existence d'un premier modèle mathématique linéaire, de dimension infinie, donnant une description détaillée d'un processus. Dès lors, il s'agissait, via une procédure d'approximation, de déterminer un autre modèle linéaire de dimension inférieure à celle du précédent et qui en soit une représentation satisfaisante.

L'originalité de ce travail a consisté à explorer des méthodes alternatives à l'identification, technique classique en théorie du contrôle, afin de trouver un modèle rationnel qui soit le plus proche du système physique étudié (et qui reflète ses propriétés) et dont l'ordre ne dépasse pas un certain entier. Toute la difficulté était alors d'explicitier le sens mathématique donné à - proche - en plongeant le système à identifier et l'ensemble des modèles rationnels dans un espace vectoriel normé. Il devenait alors possible de poser le problème sous forme d'approximation rationnelle dans un espace vectoriel normé : le choix de la norme permettait de disposer d'une mesure objective de l'erreur faite en identifiant le système à son modèle via un critère d'erreur. On avait donc, pour répondre à la question de la réduction de modèle, exhibé un paradigme optimal qui permettait de régler la dimension de l'approximant pour que la valeur de l'erreur soit minimale. Pour donner du sens à ce critère, par rapport aux

propriétés physiques des systèmes dynamiques linéaires continus de dimension d'état infinie étudiés, on a établi au cours de ce travail la qualité d'une norme particulière, la norme de Hankel : nous nous sommes concentré sur l'étude de l'approximation au sens de la norme de Hankel pour laquelle l'erreur à minimiser est définie par

$$\inf_{y_r} \sup_u \frac{\|y - y_r\|_{L^2}}{\|u\|_{L^2}}$$

où y représente la sortie du système initial y_r , celle du système réduit d'ordre r et où u représente toute entrée bornée pour la norme L^2 .

Les exemples sur lesquels nous avons décliné notre approche représentaient des phénomènes d'évolution décrits par des **équations aux dérivées partielles**, par rapport au temps et aux variables d'espace

- un problème de diffusion de chaleur, de type **parabolique**, pour lequel nos techniques d'approximation s'adaptaient assez directement : voir [38, 41] ; Cet exemple, est souvent utilisé pour traiter de questions relatives à l'énergie, notamment dans l'écriture de modèles multivariables complexes représentant des bâtiments. Nous avons comparé nos techniques d'approximation avec l'approche classique utilisant des méthodes d'approximation modale [37].
- de deux problèmes **hyperboliques** décrivant l'évolution d'une poutre en flexion et en torsion, pour lesquels une méthode originale baptisée "relaxation" a été mise au point : préalable à l'approximation de Hankel, elle permet son application lorsque les pôles associés au système hyperbolique croissent suffisamment rapidement (voir [40]).

Annulation d'écho : principe d'une commande H_∞

En prolongement de ces résultats développés dans ma thèse, nous avons entrepris un travail de recherche basé sur les techniques de commande H_∞ [6], dont on trouvera le détail en annexe de ce document, pour traiter de contrôle actif d'écho.

La problématique du contrôle actif d'écho est un sujet qui pour nous a été initié par la DRET, et motivé par un problème fondamental posé par les sous marins : il s'agit de faire en sorte que l'onde émise par une source ne soit pas perturbée, au moins sur une zone déterminée, par la présence d'obstacles sur lesquels elle se réfléchit.

Les techniques développées dans le cadre de la réduction de bruit ne sont pas directement applicables à ce problème (milieu confiné, localité, périodicité des sources...), mais la réduction de l'écho à partir de sources actives reste une idée fondamentale. Car si on dispose de capteurs (micros) et d'émetteurs (enceintes acoustiques capables de générer une onde sortante), on peut envisager d'adapter l'émission des pots vibrants aux signaux de sortie des micros, afin de minimiser l'énergie acoustique de l'onde refractée.

Dans ce problème, la principale difficulté fut l'élaboration de la formulation optimale qui permette d'élaborer, dans le cas d'une source inconnue, le contrôle annulant l'écho. Ici encore, le contrôle actif est engendré grâce à des signaux de sortie choisis en résolvant un problème de commande basé sur une formulation optimale. Le critère à minimiser, basé sur l'expression de l'énergie acoustique réfléchie, repose sur la description de l'onde perturbée dans le champ

sonore incident comme superposition de l'onde réfléchiée par l'obstacle et des ondes émises par des actionneurs.

Les étapes de l'élaboration de la formulation sont les suivantes [6] :

- On exprime l'énergie asymptotique comme norme $H^2(\Pi^+; L^2(\mathbb{S}_2))$ du champ potentiel lointain, Π^+ étant le demi-plan complexe, $\Lambda(\mathbf{x}, s)$:

$$\Lambda(\mathbf{x}, s) = r_0(\mathbf{x}, s)w(s) + \sum_{i=1}^{i=n} r_i(\mathbf{x}, s)u_i(s)$$

où $r_0(\mathbf{x}, s) = r(\mathbf{x}, s)$.

- Après développement de cette expression et son intégration sur la sphère \mathbb{S}_2 on peut écrire l'énergie comme :

$$(2.1) \quad E = \int_{-\infty}^{\infty} e^*(\omega) A(\omega) e(\omega) d\omega$$

où $e(\omega) = (w(\omega), u_1(\omega), \dots, u_n(\omega))$ et où $A(\omega) = (a_{ij}(\omega))$ est une $(n+1 \times n+1)$ matrice hermitienne avec :

$$a_{ij}(\omega) = \int_{\mathbb{S}_2} \overline{r_i(\mathbf{x}, \omega)} r_j(\mathbf{x}, \omega) d\gamma.$$

Cette suite d'écritures menée selon des considérations purement techniques conduit à l'élaboration d'un premier critère. Quelques efforts supplémentaires permettront de retrouver la forme standard d'un problème de contrôle H_∞ , basé sur une formulation optimale, bien connu dans le cas où la fonction de transfert est rationnelle. Dans le cadre du système acoustique qui nous mobilise, la dimension du système est infinie. Il faudrait alors pour expliciter une solution, déployer des approches dérivées, comme l'approximation au sens de la norme de Hankel précédemment exposée, de techniques fréquentielles multi-variables pour les systèmes de dimension infinie.

Quelques années plus tard, nous reviendrons sur la question duale de celle abordée ci dessus à la faveur d'un projet de recherche dédié à la "sécurité des biens, des personnes et des installations présents dans une zone maritime sensible" du Pôle MER PACA, labellisé en Juillet 2005. Alors que le point de vue du sous marinier recherchait une dissimulation de son propre bâtiment, les techniques recherchées dans le cadre du projet SECMAR devaient au contraire permettre de détecter les trajectoires de bâtiments ou engins en mouvement à l'aide d'un ensemble de capteurs. L'objectif étant d'assister le régulateur d'un port maritime dans son repérage d'intrus : navires en dehors de leur trajectoire nominale voir embarcations légères menaçantes. L'approche scientifique fut alors assez différente et impliqua deux niveaux de réflexion développés au cours de deux thèses.

Le premier niveau reprenait des approches permettant la détection de source, afin d'optimiser le positionnement de capteurs et de localiser des sources acoustiques passives [57, 56].

Le second niveau visait à caractériser le comportement de bâtiments se déplaçant en zone surveillée, en s'appuyant notamment sur des modèles de markov cachés [71, 70] et en leur associant une description basée sur un formalisme hybride faisant communiquer des processus dynamiques continus et événementiels [62, 63] : ce formalisme offre un cadre particulièrement

adapté aux problèmes qui se décomposent en tâches continues de type suivi (de trajectoire) et en tâches événementielles (réaction à une modification de l’environnement, ou de comportement).

Si des méthodologies ont été mises en oeuvre avec succès au cours des travaux de recherche de nos deux doctorants [56] [69], la complexité de la détection de comportement suspect reste entière. La définition associée dans les travaux précédents s’est appuyée sur l’écart à la trajectoire nominale, calibrée par apprentissage sur les données fournies par le port, via une méthode de prédiction de manoeuvres et par abus de comportement, à base de chaînes de Markov cachée [70] ; elle permet de détecter une alarme pour une erreur au delà d’une limite, apprise elle aussi. Il s’agit donc ici, non pas de considérer le comportement suspect comme constitutif du critère, mais de l’y transcrire de façon détournée, via la référence à une classe de trajectoires admissibles. Ceci souligne la complexité de la formulation optimale d’un problème où il s’agit de rendre compte, au delà d’éléments d’appréciation technique (issus de la physique, la mécanique, la finance, ...), du fait que l’homme est au centre de la boucle.

C’est dans le cadre d’un projet financé par le programme PREDIT du Ministère des transports HYBRISIM (HYBRId SIMulation) labellisé dans le cadre du PREDIT 2002-2005 en partenariat avec Renault et le Collège de France (LPPA) : **commande et perception de conduite** que nous avons été pour la première fois initiés à cette difficulté.

Restitution de la perception et de la sensation dans un simulateur de conduite

Quelques éléments de contexte pour commencer, pour ceux qui ne seraient pas familiers avec les simulateurs de conduite. Leur motivation est multiple, mais un des éléments qui a favorisé leur déploiement au sein des constructeurs automobiles est la question de la sécurité routière, préoccupation majeure au sein de l’Union Européenne. Cette question a engendré la généralisation de systèmes de sécurité passive dans les véhicules et le développement des systèmes d’aide à la conduite qui permettent d’augmenter le confort et la sécurité active du conducteur.

L’efficacité réelle de ces différents systèmes dépend tout autant de leur fiabilité technologique que de leur adéquation aux tâches de conduite visées. Leur processus de validation est réalisé au moyen d’essais statiques en environnement contrôlé (laboratoire) et d’essais réels sur piste ou sur route par des essayeurs experts : d’une part de nombreux essais réels sont nécessaires et réclament la construction d’autant de prototypes ; d’autre part certains tests sont biaisés par l’expertise des essayeurs ou restent techniquement irréalisables pour des raisons de sécurité.

C’est particulièrement vrai des situations de circulation critiques comme le freinage d’urgence, l’évitement, la survitesse en virage, la variation d’adhérence, la présence d’un obstacle imprévu ou bien des situations de perte de vigilance ou d’attention liées à des pathologies ou des prises médicamenteuses.

Aussi, pour que les futurs systèmes d’aide à la conduite contribuent efficacement à la sécurité routière, l’étude du couple véhicule conducteur doit être présente dès les phases de concep-

tion et ne doit pas se limiter à une validation a posteriori sur prototype roulant de série. C'est pourquoi, le simulateur de conduite, qui apporte une réponse déjà validée pour son efficacité dans le cadre d'études ergonomiques, d'interfaces véhicule conducteur et de confort a été adopté comme outil d'étude du couple véhicule conducteur. La limitation des déplacements des plateformes de simulation rendant complexe la restitution des mouvements du véhicule au conducteur, notre contribution devait permettre aux simulateurs en cours de développement de répondre à ces besoins avec un double objectif :

1. améliorer la performance de restitution inertielle des simulateurs ;
2. approfondir la connaissance du comportement du conducteur dans les situations critiques grâce à l'apport de la modélisation hybride.

Le premier objectif plaçait d'emblée la question de la représentation de la perception du mouvement au centre du problème de modélisation ; il fallait :

- définir le critère permettant de mesurer la perception par l'homme du mouvement d'un véhicule ;
- restituer les éléments nécessaires à la reproduction de cette perception via la plateforme dynamique de simulation.

La question de la définition du critère permettant de mesurer au mieux la perception s'est alors avérée centrale.

Une analyse systématique des modèles connus de perception a été réalisée [25] pour comprendre le mécanisme des capteurs vestibulaires (ototholiques et semi-circulaire), la perception du mouvement propre parvection (immobilité de la scène visuelle alors que l'observateur se perçoit en mouvement) et d'en réaliser des modèles : en effet, les accélérations physiques du conducteur n'étant pas celles qu'il perçoit (seuils de détection, ambiguïté sensorielle,...) des modèles de perception de son accélération propre ont été intégrés dans les stratégies de commande des plateformes [26] afin de restituer une sensation d'accélération aussi proche que possible de celle perçue dans le monde réel.

D'autre part, en simulation de conduite, la restitution des indices inertiels se fait à l'aide de plateformes mécaniques (sièges vibrants, plateforme de Gough-Stewart) à base fixe ou mobile. Du fait des limitations mécaniques des plateformes (excursion et dynamique des vérins, espace de travail limité, ...) il n'est pas possible de reproduire à l'identique les accélérations qu'un conducteur perçoit en situation réelle de conduite et un compromis doit être réalisé entre la restitution des indices inertiels et le maintien de la plateforme dans ses limites physiques.

Ce compromis doit être choisi de façon à maintenir une " unité perceptive " du conducteur, c'est-à-dire de façon à réduire autant que possible les conflits sensoriels provoqués par des incohérences temporelles (décalage dans le temps entre les signaux sensoriels perçus par le conducteur) ou par des incohérences spatiales (perception différente des déplacements dans la scène visuelle et dans l'espace de la plateforme.)¹ Pour réaliser un tel compromis, et au delà des stratégies de commande de plateforme classiques, une approche dédiée a été élaborée.

Afin de pallier aux défauts évalués sur la plate forme existante, dont la dynamique incertaine [25] dépend de la position qu'elle occupe, et dont les axes sont couplés, il s'est avéré pertinent de mettre au point d'un simulateur dynamique d'une plateforme six axes de type Gough-Stewart prenant en compte les dynamiques et les contraintes des verins [24].

1. Ces conflits sont considérés comme la cause principale du mal du simulateur (vertiges, osciloscopie, suées, nausées).

Ce simulateur, complètement paramétrable, a alors permis de tester différentes stratégies de commande de la plateforme et de leur associer un “indice de performance” mesurant la qualité de la restitution du mouvement et la qualité d’utilisation de l’espace de travail du robot, [27], [26].

Parallèlement, à la mise au point d’un simulateur dynamique, une nouvelle approche de la restitution d’indices inertiels reposant sur des techniques de planification des trajectoires (Model based Predictive Control) prenant explicitement en compte les contraintes physiques et perceptives [16], [17] a prouvé garantir une meilleure utilisation de l’espace de travail constructeur du robot, et être moins sensible à l’erreur de modèle (seule la première commande est appliquée); par ailleurs, elle minimise les conflits sensoriels car les contraintes de perception sont intégrées dans le calcul de la commande. En effet, lorsque la plateforme arrive en butée aucun indice sensoriel n’est restitué et un second algorithme de retour en position neutre, indépendant du premier, permet de diminuer les conflits sensoriels. Les résultats obtenus en simulation ont été confirmés lors des essais sur la plateforme prototype de nouvelle génération développée alors par Renault, la plateforme ULTIMATE [16], [15].

La synthèse d’un contrôle permettant de restituer les sensations d’un conducteur embarqué dans le simulateur s’est avérée fructueuse grâce à l’intégration de la sensation subjective ressentie par l’homme et à l’exploitation du déplacement de la plateforme dynamique en un critère unique. Son élaboration a nécessité de s’appuyer sur des démarches classiques du contrôle, nécessitant pour l’élaboration du formalisme optimal une incursion essentielle dans les sciences cognitives grâce à une collaboration avec le LPPA au Collège de France.

Chapitre 3

Des problèmes complexes liés à l'énergie et au climat

On voit se dessiner donc le socle d'une approche scientifique, fondée sur ce paradigme d'optimalité et qui se décline dans une vision disciplinaire transversale, pour traiter d'applications complexes.

Et dans cette vision transdisciplinaire, nous rejoignons Marie-Anne Frison-Roche dans le constat de : "l'exigence paradoxale de la transdisciplinarité : l'accueil de l'autre assorti à l'ignorance bienvenue de son savoir".

Encore fallait-il que se dessine une application privilégiée. Le contexte nous a été particulièrement favorable pour faire émerger une histoire passionnante tant par sa complexité scientifique intrinsèque que par ses enjeux contemporains et pour les générations futures : il s'agit des questions d'énergie et de climat. En 2012, l'implication de la communauté scientifique et des mathématiciens en particulier sur ce sujet n'est plus contestée, voire est encouragée. En 1999, les choses n'étaient pas aussi simple et il nous paraît intéressant de revenir sur la genèse de notre intérêt pour ces questions. Le point de départ de notre implication est la déréglementation des marchés de l'énergie, initiée par une directive européenne en 1996. Nous avions l'intuition que nous assistions à une mutation profonde du monde de l'énergie, et que nos compétences seraient utiles à son accompagnement. Et pour mieux s'y préparer il nous fallait comprendre les bouleversements en cours : c'est à cette fin que nous avons fait en Octobre 1999 une analyse de ce qui se disait dans le quotidien Le Monde entre Décembre 1998 et Avril 1999 principalement, qu'il nous paraît intéressant de retranscrire ici.

Les modifications de la donne énergétique, N. Maïzi, Octobre 1999

Les conséquences de la directive européenne du 19 Décembre 1996 ayant pour objet l'ouverture progressive du marché de l'électricité, en France à partir du 19 Février 1999, sont multiples : cette future déréglementation aura pour effet de complexifier l'approvisionnement énergétique pour des groupes qui connaissent des contextes nationaux variables.

Témoins d'héritages particuliers¹ les échéanciers mis en place suivant les pays pour l'application de cette directive sont radicalement différents :

- l'échéancier français est progressif et à minima²
- les autres états ont adopté un calendrier où l'ouverture à la concurrence est beaucoup plus rapide³.

Dans le contexte du monopole historique d'EDF la transposition de cette directive au niveau français est plus difficile que partout ailleurs⁴. Cela se traduit par un certain nombre d'amendements au projet de loi initial, concédés dans le but d'obtenir l'abstention du groupe communiste au cours du vote de l'assemblée⁵ ; sont ainsi adoptés un certain nombre de principes qui ne tiennent pas forcément compte des doléances des nouveaux entrants tels Vivendi (ex-Générale des eaux), Suez-Lyonnaise des eaux et Air Liquide⁶ et des craintes formulées par les observateurs⁷ ; ainsi ils correspondent plutôt au souci de préserver un certain nombre de garanties à EDF afin de conserver son rôle prédominant⁸ ; il s'agit des mesures suivantes⁹

- clause de réciprocité avec les étrangers : protégeant le marché français elle freine néanmoins la pénétration sur le plan européen des français
- élargissement du principe de spécialités
- création d'une commission de régulation de l'électricité (CRE) : elle fait suite aux préoccupations énoncées dans le rapport de Géraud Guibert sur la "politique énergétique de la France"¹⁰
- mis en place d'un GRT (gestionnaire du réseau de transport) : il est responsable notamment de la fixation du prix du "timbre-poste".

La France ayant pris l'option la plus lente pour aborder cette nouvelle situation concurrentielle, il est intéressant d'analyser ce qui se passe sur les marchés qui sont entrés directement dans une logique ultra libérale et de souligner la stratégie mise en place par les grands groupes pour tirer profit de la nouvelle législation.

Voyons le cas allemand : on peut

- y observer les problèmes concrets qui se posent dans ce pays où l'option ouverture à 100% a été adoptée¹¹ et de noter que si les grands groupes industriels ont des arguments pour négocier les prix à la baisse, les PME et les particuliers sont totalement exclus de ce type d'exercice ;
- constater que les entreprises comme EDF limitées théoriquement par la clause de réciprocité¹² tentent d'investir le marché allemand ;

1. *Le marché européen de l'électricité s'ouvre à la concurrence*, D. Gallois, *Le Monde* 17/02/99, p 16

2. *La France accepte la libéralisation à contre-cœur*, D. Gallois, *Le Monde* 17/02/99, p 16

3. *La déréglementation selon les pays*, *Le Monde* 10/12/98, p20

4. *Le marché européen de l'électricité s'ouvre à la concurrence*, D. Gallois, *Le Monde* 17/02/99, p 16

5. *La libéralisation du marché de l'électricité limitée par les députés*, D. Gallois et J.B. De Montvalon, *Le Monde* 20/02/99, p 21

6. *Les doléances des nouveaux entrants*, Martine Orange, *Le Monde* 10/12/98, p 20

7. *Quelle concurrence sur le marché de l'électricité ?*, Philippe Delelis et François Essig, *Le Monde* 12/12/98, p 14

8. *Le marché de l'électricité s'ouvre progressivement à la concurrence en France*, Dominique Gallois, *Le Monde* 10/12/98, p 20

9. *La France accepte la libéralisation à contre-cœur*, D. Gallois, *Le Monde* 17/02/99, p 16

10. *Pour l'énergie, le PS estime nécessaire une régulation publique*, Michel Noblecourt, *Le Monde* 15/01/99, p 6

11. *Les débuts hésitants de la concurrence en Allemagne*, Philippe Ricard, *Le Monde* 17/2/99, p17

12. *Les projets d'EDF outre-Rhin dérangent les électriciens allemands*, Philippe Ricard, *Le Monde* 5/3/99, p16

- noter les déboires des américains qui veulent également attaquer le marché allemand¹³ avec une stratégie agressive et déjà bien rodée¹⁴.

De façon générale, on observe que les grands groupes se restructurent pour tirer au mieux profit de la situation concurrentielle engendrée par la déréglementation¹⁵. Pour exemple Suez-Lyonnaise et Tractebel : limogeage du patron de cette dernière qui voulait s'associer à Electrebel ce qui aurait eu pour conséquence une perte de la position majoritaire détenue par l'actionnaire SGB (Société Générale de Belgique) filiale de Suez-Lyonnaise¹⁶.

Ainsi et comme le constate B. Dessus¹⁷ "l'Europe de l'énergie se construit à grands pas autour de l'interconnexion des réseaux d'électricité et de gaz et l'ouverture des marchés à tous les producteurs d'énergie avec la bénédiction de nos gouvernants". Ceci intervient au moment où la tendance est à la diversification car le contexte énergétique mondial a complètement changé : en témoignent

- les indécisions sur le renouvellement du parc nucléaire en 2010 et la poursuite de l'EPR (European Pressurized Reactor) en collaboration avec Siemens et les électriciens allemands suite à la décision de l'abandon par l'Allemagne de la filière nucléaire¹⁸ ; d'autant que le rapport "Energie 2010-2020" du commissariat général au plan indique que la France est suréquipée pour ce qui est de son parc nucléaire¹⁹ ;
- la vocation des états à tenir les engagements pris en décembre 1997 à Kyoto quant à la réduction des émissions polluantes²⁰ ;
- la compétitivité nouvelle du gaz, et l'émergence de nouveaux types d'installations : exploitant la cogénération ou à cycle combiné elles fournissent chaleur et courant²¹.

Cet état des lieux justifie les préoccupations énoncées par Francois Roussely PDG d'EDF nommé en Juillet 1998 dans la question suivante : "comment une entreprise qui a bâti sa prospérité sur cinquante ans de monopole électrique dans un seul pays pourra se développer comme fournisseur d'énergie dans un univers concurrentiel?"²². Toujours dans le même ordre d'idées, il déclare le 13 mars 1999 : "l'ouverture à la concurrence transforme les règles du jeu sur les marchés électriques et transforme le métier d'EDF"²³. Ceci signifie que face aux changements de la donne énergétique et des règles de concurrence, les professionnels sont conscients qu'il ne faut pas simplement faire évoluer les mentalités mais qu'il faut également envisager une transformation du métier. Autres témoignages de cette prise de conscience :

- la méfiance des anciens de Tractebel vis à vis de J.-P. Hansen nouvellement nommé à la

13. *Les projets d'EDF outre-Rhin dérangent les électriciens allemands*, Philippe Ricard, *Le Monde* 5/3/99, p16

14. *La croisade européenne de l'américain Enron*, Marc Roche, *Le Monde* 2/4/99, p20

15. *La fringale des grands patrons*, *Le Monde* 30/3/99, p 1

16. *Suez-Lyonnaise réaffirme son rôle de premier actionnaire de Tractebel*, Martine Orange et Luc Rosenzweig (à Bruxelles), *Le Monde* 15/1/99 et *Suez-Lyonnaise des eaux transfère en Belgique son pôle énergie*, Martine Orange et Luc Rosenzweig (à Bruxelles), *Le Monde*, 18/3/99

17. *Maîtriser et diversifier l'énergie*, *Le Monde* 23/1/99, p13

18. *La décision allemande va contraindre les industriels français à accélérer leur restructuration*, Dominique Gallois, *Le Monde* 21/1/99, p6

19. *Climat et Europe, des choix déterminants*, Hervé Kempf, *Le Monde* 21/1/99, p7

20. *Climat et Europe, des choix déterminants*, Hervé Kempf, *Le Monde* 21/1/99, p7

21. *Le gaz naturel, un concurrent sérieux*, Dominique Gallois, *Le Monde* 1/12/98, supplément et *Gaz de France a connu en 1998 une année record*, Dominique Gallois, *Le Monde* 10/2/99

22. *M. Roussely : malgré son retard, EDF est prête à affronter la concurrence*, 19/2/99, p17

23. *EDF entre sans états d'âme dans la concurrence*, Dominique Gallois, 13/3/99, p18

- tête de cette entreprise parce qu'il "a travaillé toute sa vie dans le secteur réglementé" ²⁴ ;
- la démarche d'Enron ²⁵, compagnie énergétique américaine, est exemplaire : ce groupe est décrit comme étant un "véritable supermarché du négoce énergétique" et l'on dit de son directeur général pour l'Europe qu'il appartient à une nouvelle race d'électriciens : ceux "qui s'efforcent de fournir une solution énergétique aux besoins spécifiques du client", les "power marketer" ou intermédiaires en électricité ²⁶.

Pour aller plus loin, il faut également souligner le fait qu'en Europe, "la déréglementation", voulue par Bruxelles "est en train de modifier toute la carte de l'énergie du continent". Les groupes diversifient non seulement leur offre en terme de produit (eau, traitement des déchets) mais également en fonction de leurs interlocuteurs (on ne traite plus le client de façon collective mais de façon différenciée). ²⁷. Exemplaires à ce sujet, les marchés déjà remportés par Air Liquide au détriment d'EDF ²⁸. Ainsi la déréglementation est en train d'opérer une mutation dans le métier ²⁹, mais également dans les services offerts par les grands groupes. C'est ce qui a été revendiqué par EDF et baptisé dans le projet de loi voté à l'assemblée nationale : "l'élargissement du principe de spécialités".

Il ne faut pas s'étonner du type de diversification ³⁰ choisis par les groupes car comme le souligne I. Ramonet ³¹ : "Les entreprises privatisées sont particulièrement prisées par les investisseurs car elles ont bénéficié d'une restructuration financée par l'Etat et, de surcroît, leurs dettes ont été épongées. Elles représentent des placements fort attractifs. En particulier celles des secteurs de première nécessité (électricité, gaz, eau, transports, télécommunication, santé) qui assurent un revenu régulier très rentable, dénué de risque, et où des investissements préalables pouvant durer des décennies ont été faits par l'Etat."

Contexte et motivations

Dés lors, la déréglementation des marchés de l'énergie, nécessite des acteurs traditionnels qu'ils s'adaptent à la nouvelle donne concurrentielle et changent en profondeur leurs comportements. Les exemples d'adaptation sont nombreux. Aujourd'hui, EDF, l'acteur historique français, ouvre son monopole et affronte de nouveaux producteurs sur un marché restreint de clients éligibles (selon la directive européenne, un seuil de consommation d'électricité détermine l'éligibilité des consommateurs). Dans un avenir proche, l'ouverture du marché sera totale et chaque consommateur choisira son fournisseur librement. Pour conquérir ces nouveaux marchés, les stratégies des producteurs sont diverses : offrir de nouveaux services (associer à l'énergie la fourniture d'eau par exemple), proposer des conseils et audits (pour la maîtrise de la consommation, la réhabilitation d'installations), redéfinir les contrats de fourniture...

24. *Suez-Lyonnaise des eaux transfère en Belgique son pôle énergie*, Martine Orange et Luc Rosenzweig (à Bruxelles), *Le Monde*, 18/3/99

25. Remarque de Juillet 2012 : non, personne n'anticipait alors ce que serait la retentissante faillite de la multinationale en Décembre 2001 !

26. *La croisade européenne de l'américain Enron*, Marc Roche, *Le Monde* 2/4/99, p20

27. *Les services collectifs suscitent de nouvelles convoitises*, Martine Orange, *Le Monde* 2/4/99, p20

28. *Air Liquide un acteur atypique face à EDF*, Martine Orange, *Le Monde*, 15/4/99, p20

29. *Le supermarché londonien de l'électricité*, Marc Roche, *Le Monde*, 15/4/99, p20

30. *Les principaux intervenants en Europe*, *Le Monde* 2/4/99, p20

31. *Firmes géantes, Etats nains*, Ignacio Ramonet, *Le Monde Diplomatique*, 06/98, p1

Par ailleurs, la pression environnementale de plus en plus présente dans le contexte national et international contraint l'offre des acteurs en concurrence (suppression des émissions de soufre, ratio minimum d'énergies renouvelables dans les productions nationales en Europe...).

Enfin, dans le cadre des efforts de restrictions des émissions de gaz à effet de serre, les mécanismes proposés aux États par le protocole de Kyoto sont nombreux, complexes et non encore définitifs. Une analyse fine de leurs implications sur le marché de l'énergie s'impose afin de déterminer le meilleur compromis économique pour chaque acteur.

Nous allons revenir plus particulièrement sur deux développements originaux dans ce contexte toujours basé sur la construction de l'approche optimale adaptée : une étude sur l'optimisation d'un site de cogénérations et coûts marginaux associés [44] ; un projet financé par l'ADEME et réalisé en collaboration avec L'INRIA, décliné dans le contexte des marchés financiers de l'électricité et du carbone et des engagements climatiques autour de l'usage du concept de "pricing par indifférence" [45], [60], [7].

Optimisation d'un site de cogénérations

Le but de cette étude consistait à mesurer l'avantage pour un opérateur de proposer à ses clients une offre multi-énergies associant électricité et chaleur à partir d'un parc de production distribuée de cogénérations. Quelles puissances a-t-il intérêt à installer sur chacun de ses sites clients ? Comment doit-il arbitrer entre son parc de production distribuée et un marché d'approvisionnement en électricité ? Telles sont les questions auxquelles on va s'efforcer de répondre et dont les éléments liés à l'étude des coûts marginaux d'opération sont détaillés dans la publication suivante.

Optimal operational loads for distributed cogeneration power plants

Nadia Maïzi^{1,*} and Marc Bordier^{1,**}

¹ Ecole des Mines de Paris/ParisTech, Center for Applied mathematics, BP 207, 06904 Sophia-Antipolis cedex, France.

The purpose of this paper is to determine the operating mode of a cogeneration system that minimises its overall cost of operation. The optimisation procedure is achieved in two steps:

- First, we consider a single unit and we develop a convex but non differentiable formulation for the operating cost. Furthermore an explicit expression for the optimal operational mode parametrized with heat and power consumer demand and with electricity market price, is obtained;
- Then, we express for the distributed cogeneration system the overall operating cost. This objective function is still convex and non differentiable and the optimisation procedure requires subdifferential calculus, via the Moreau-Rockafellar and the Duboviskii-Milyutin theorems [1].

The final result describing the best operating mode for the overall set of cogeneration units relies on the ordered sequence of marginal costs associated with the different operational modes for each unit. It indicates that the optimal operation of the distributed cogeneration system is achieved through an economic dispatch mode.

© 2007 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

1 Supplying Power versus Heat and Power

A cogeneration system provides electrical (or mechanical) and useful thermal energy from the same primary energy source [3]. When comparing efficiencies between cogeneration and separate production of electricity and heat, it appears that cogeneration allows considerable savings in fuel consumption. But, beside these important environmental issues, economical viability of a cogeneration project is still challenging for operators especially when a set of cogeneration units is concerned. Economical viability relies on many factors, among which how to operate each unit. In this study, we shall focus on the heat-match mode where the operator's priority is to satisfy the local heat consumer demands. When these demands are satisfied (possibly by means of auxiliary boilers), the amount of excess electricity is exported to the grid, while the lack of electricity is bought from an electricity market. In this framework, we shall consider an operator who operates over a given designed (technology, size, location) set of cogeneration units and we shall tackle the following question : what are the optimal unit operational loads that minimise the total cogeneration operation cost.

2 Optimal operating load for a single unit

In the following, we consider only reciprocating internal combustion engine cogeneration systems. These are the most widespread cogeneration systems because of their high efficiencies, their availability in a broad range of powers (15 kW-50 MW) and their operability on a broad range of fuels (from natural gas to residual fuel oil) [3]. The engine drives the power generator and heat is recovered from cooling circuits (oil,water,air) and exhaust gasses. In small engines, only hot water is recovered.

Combustion engine cogeneration systems have interesting thermal properties. They can operate within a wide range of electrical load and, at first approximation, their total efficiency is insensitive to load variations. Moreover, within the operating range, we can consider that electricity and heat productions are related to each other by an affine relation. Denoting by m the electrical operating load ($0 \leq m \leq 1$), by $\rho_{\text{heat}}(m)$ and $\rho_{\text{elec}}(m)$ the thermal and electrical efficiencies, by $P_{\text{heat}}(m)$ and $P_{\text{elec}}(m)$ the corresponding thermal and electrical productions and finally by ρ the constant total efficiency of the system, we can model the combustion engine by the following two equations

$$\rho = \rho_{\text{heat}}(m) + \rho_{\text{elec}}(m) \quad \alpha P_{\text{elec}}(m) + \beta P_{\text{heat}}(m) = \text{Cste}$$

Cogeneration is the combined production of electrical and useful thermal energy from the same primary energy source. To define cogeneration efficiency, we have to consider energy savings when comparing cogenerated and separate productions of electricity and heat. This is done using an exergetic point of view. For a load m and heat production $P_{\text{heat}}(m)$, let us define the useful heat production by $\tau P_{\text{heat}}(m)$ ($0 \leq \tau \leq 1$). To produce the same amount of heat with a boiler of efficiency ρ_{boiler}

* Corresponding author E-mail: nadia.maizi@cma.enscm.fr, Phone: +33 (0)4 97 15 70 79, Fax: +33 (0)4 97 15 70 66

** E-mail: marc.bordier@cma.enscm.fr, Phone: +33 (0)4 97 15 70 80, Fax: +33 (0)4 15 70 66

we should have used a fuel power equal to $\tau P_{\text{heat}}(m)/\rho_{\text{boiler}}$. These considerations lead to an equivalent electrical efficiency ρ_{equiv} (or cogeneration efficiency) definition and a per unit electrical variable cost $C_v(m, \tau)$ given by

$$\frac{1}{\rho_{\text{equiv}}(m, \tau)} = \frac{1}{\rho_{\text{elec}}(m)} - \left(\frac{\tau}{\rho_{\text{boiler}}} \right) \frac{1}{\rho_{\text{heat}}(m)} \quad C_v(m, \tau) = \frac{C_{\text{fuel}}}{\rho_{\text{equiv}}(m, \tau)} + C_{\text{omf}}$$

where C_{fuel} is the fuel cost and C_{omf} is the fixed operation and maintenance costs (that do not depend on the useful energy).

Let $P_{\text{heat}}^{\text{demand}}$ be the consumer heat demand, and let us suppose the engine operates at load m . Since cogeneration efficiency is an increasing function of τ , the best cogeneration efficiency is obtained for the maximum energy savings and is given by

$$\rho^*(m) = \rho_{\text{equiv}}(m, \tau^*(m)) \quad \text{where} \quad \tau^*(m) = \min \left(\frac{P_{\text{heat}}^{\text{demand}}}{P_{\text{heat}}(m)}, 1 \right)$$

But, given a load m , when operating at the maximum cogeneration efficiency, neither the heat demand nor the electrical demand are necessary fulfilled. In particular, when electrical production is not sufficient, electricity must be bought from the market at some price p_{elec} . Actually, the loads at which electricity or heat demands are fulfilled play an essential role. They will be denoted respectively by w and λ . Let us remark that, when operating at the maximum cogeneration efficiency, λ and w depend only on the engine characteristics and on the heat and electricity demands.

Then, combining the expressions above together with some algebra, the total operating cost for a cogeneration unit can be shown to be given by the following expression

$$C(m, \lambda, w) = p_{\text{elec}} \max(0, w - m) + \max_{i=1, \dots, 3} (a_i(\lambda, w) + b_i(\lambda, w) m)$$

where $b_i(\lambda, w)$ ($i = 1, 2, 3$) is a positive increasing sequence for every given λ and w . For given heat and electricity demands, the optimal operating load for a cogeneration unit is therefore obtained as the solution of the parametrized minimization problem

$$\min_m C(m, \lambda, w) \quad \text{subject to} \quad m \in [0, 1]$$

For any given λ and w , the cost function $C(m, \lambda, w)$ is clearly convex as a sum of convex functions [2] of m but it is not everywhere differentiable. Its subdifferential $\partial C(m, \lambda, w)$ wrt. m is easily obtained and the optimality condition forces the optimal operating mode to take one of the following values $m^* \in \{0, \lambda, w, 1\}$ according to the relative position of the market price p_{elec} wrt. to the $b_i(\lambda, w)_{i=1,2,3}$ and to the relative positions of λ and w wrt. 0 and 1. It is noteworthy that the $b_i(\lambda, w)_{i=1,2,3}$ which depend on the economic and thermodynamic characteristics of the cogeneration system, can be interpreted as marginal operating costs and that the optimal operating load is obtained by “merit order” scheduling.

3 Optimal operating loads for distributed CHP (Combined Heat and Power) units

When operating distributed CHP units, heat production is still local but electricity can be exchanged between units through the network at some cost. To obtain the total operating cost, let us define for unit i ($i = 1, 2, \dots, N$) its operating load m_i , its relative weight α_i wrt. the overall installed power, its characteristic loads λ_i and w_i defined as above via the local heat and electricity consumer demands and let us denote by $C_i(m_i, \lambda_i, w_i)$ its operational cost. Then the total operating cost is

$$C(m_1, \dots, m_N) = p_{\text{elec}} \max \left(0, W - \sum_i \alpha_i m_i \right) + \sum_i \alpha_i C_i(m_i, \lambda_i, w_i) \quad \text{where} \quad W = \sum_i \alpha_i w_i$$

and the optimization problem reads

$$\min_{(m_1, \dots, m_N)} C(m_1, \dots, m_N) \quad \text{subject to} \quad (m_1, \dots, m_N) \in [0, 1]^N$$

It can be shown [2] that the cost function is convex but, as above, not everywhere differentiable. However, the subdifferential can be obtained through the Moreau-Rockafellar theorem (sum of subdifferentials) and the Duboviskii-Milyutin theorem (subdifferential of the supremum of a finite family of convex functions) that yield an explicit formulation of the optimal solution.

Once again, this solution has an economical interpretation in terms of the different operating marginal costs for each unit and can be proved to express as a merit order scheduling.

References

- [1] E. J. Balder, On subdifferential calculus, LNMB crash course on convex analysis and applications (2001).
- [2] S.P. Boyd, and L. Vandenberghe, Convex Optimization. (Cambridge University Press, 1984).
- [3] EDUCOGEN: An Educational Tool for Cogeneration (COGEN Europe report and studies 2001 and 2002).

Valeur carbone court terme : pricing par indifférence

Ce travail est réalisé dans le cadre d'un contrat ADEME en collaboration avec l'INRIA et nous reprenons ici quelques éléments du rapport intermédiaire [7].

Le marché européen de permis d'émission de CO_2 (EU ETS (european emission trading system)), qui existe depuis 2005, a été conçu comme un moyen d'encadrement et d'accompagnement de la réduction des émissions de CO_2 voulue par l'Union Européenne dans certains secteurs de l'industrie (notamment la production d'énergie, les industries minérales, de la métallurgie et du papier).

Notre approche propose de s'interroger sur l'efficacité d'un tel dispositif quant aux réductions effectives d'émissions de CO_2 . Nous avons élaboré un modèle dont le développement et l'analyse quantitative devraient fournir un outil d'analyse a priori du comportement en termes d'émissions d'un agent (un industriel) participant à l'EU ETS. L'étude de la sensibilité de l'agent aux paramètres du marché devrait permettre d'élaborer un design (de marché et donc un choix des paramètres) qui soit cohérent avec les objectifs de réductions des émissions de CO_2 fixés par le régulateur.

Les premières réflexions se sont portées sur le secteur de l'électricité et la position d'un producteur d'électricité devant arbitrer entre les options suivantes :

- couvrir annuellement ses émissions de gaz
- ou payer une pénalité.

Le producteur d'électricité possède un parc de production constitué de n moyens différents de production (centrales thermiques, nucléaires, barrages, éoliennes...). Ce producteur est soumis au système des quotas d'émission de CO_2 . Pour une période de gestion donnée, il doit optimiser un plan de production, qui engendre des émissions de CO_2 . Son arbitrage peut s'appuyer sur l'achat/vente de quotas de CO_2 à un prix plus ou moins élevé.

Déterminer la position du producteur dans ce marché des permis, analyser son prix d'achat/vente constituent les objectifs de cette modélisation.

Notre choix méthodologique[60] consiste à estimer le prix d'indifférence des permis, qui

- rend compte d'une optimisation individuelle pour un agent (un producteur) par rapport au marché de CO_2 et par rapport au marché de l'électricité, et ainsi reste sensible au mix énergétique du portefeuille de production,
- capture la valeur limite en dessus/en dessous de laquelle, l'agent est intéressé à vendre/acheter des permis,
- dépend de l'aversion au risque de l'agent,
- permet de mesurer la sensibilité d'un producteur au plan d'allocation et au design de la pénalité en cas de non conformité,
- mais ne constitue pas une modélisation de la dynamique des permis d'émission sur le marché du CO_2 .

Le prix d'indifférence des permis de CO_2 pour un producteur d'électricité

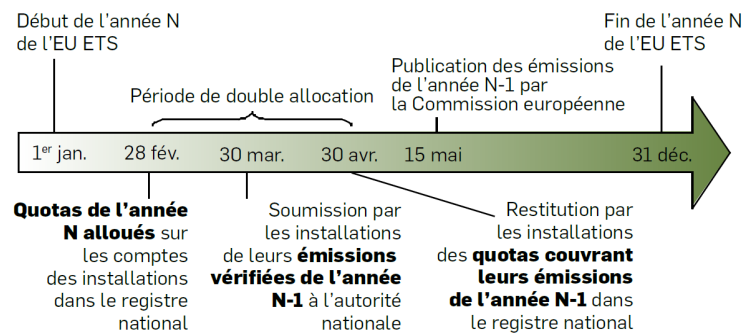
Rappelons que le secteur de la production d'électricité et de chaleur représente près de 30% des émissions de gaz à effet de serre dans l'Union Européenne (et 70% du plan d'allocation pendant la phase I) ; d'autre part un producteur d'électricité peut modifier en continu l'intensité carbone de sa production en substituant deux moyens de production (par exemple en utilisant une centrale au gaz plutôt qu'une centrale au charbon qui émet plus de CO_2 pour la même production) ; enfin l'inélasticité de la demande en électricité et la cotation en continu du prix de l'électricité permettent d'obtenir des modèles aléatoires réalistes pour le processus décrivant le prix de l'électricité.

Nous listons les éléments de la modélisation.

- **Une période de gestion** $[0, T]$, fixant un intervalle de temps entre une date de référence servant d'origine $t = 0$ et une échéance T . Pour le marché de CO_2 , cette période coïncide a priori avec une période de conformité. L'horizon d'investissement T est la date de conformité, au moment où les quotas doivent être restitués ou/et la taxe éventuellement payée.

Pour la phase (2008 - 2012), les règles de EU ETS sont les suivantes : chaque pays élabore un Plan National d'Allocation de Quotas (PNAQ) pour la phase à venir. Ce PNAQ détermine la quantité de quotas qui sera distribuée à chaque installation durant la phase II. Un quota (ou permis d'émission) correspond au droit d'émettre une Tonne de CO_2 (*eqT CO_2*).

La phase est divisée en périodes annuelles. A chaque début de période une installation reçoit un certain nombre de quotas. A chaque fin de période, l'installation doit restituer autant de quotas qu'elle a émis de CO_2 durant la période. Les quotas restitués sont annulés alors que les quotas conservés par l'installation pourront être utilisés pour se mettre en conformité lors de la période suivante. Durant la période, les installations peuvent faire des échanges commerciaux de quotas, mais aussi acheter des crédits carbone type Kyoto dans la limite d'un certain pourcentage de la quantité de quotas qui leur a été allouée (ce pourcentage diffère selon les pays). Le calendrier d'allocation des quotas permet d'uti-



Source : Mission Climat de la Caisse des Dépôts.

FIGURE 3.1 – Calendrier institutionnel de l'EU ETS

liser les quotas reçus au titre d'une période pour se mettre en conformité à la fin de la période précédente (voir Figure 3.1). Cependant à la fin de la phase, l'installation devra

obligatoirement se mettre en conformité avec des quotas distribués pendant cette phase. Si l'installation ne rend pas assez de quotas pour couvrir ses émissions, elle devra payer une pénalité proportionnelle au surplus d'émissions. Pour la phase 2008-2012, la pénalité a été fixée à 100€ par (eq)T CO_2 . D'autre part le surplus d'émissions est comptabilisé dans les émissions de l'installation pour la période suivante.

Dans notre modélisation, l'instant de début de période fixe l'origine des temps $t = 0$. L'ordre de grandeur de T est une année.

L'échelle de temps est un point important pour comprendre la granularité de la modélisation. Même si nous décrivons le modèle en temps continu, les plans de production se font par tranches horaires. Il paraît naturel de choisir un pas de temps horaire ($dt = 1/8760$). Cependant, si on choisit de faire certaines approximations consistant à négliger (ou plutôt lisser) les temps de latence des centrales et les coûts de mise en route et d'extinction, il paraît plus raisonnable de choisir un pas de temps journalier ($dt = 1/365$).

- **A l'échelle de temps du modèle**, à chaque instant le producteur décide de la puissance instantanée π_t^i (en MW) que fournit le moyen de production $i \in \{1, \dots, n\}$ pour chacune de ses installations. Chaque moyen de production i est contraint par une puissance instantanée maximale disponible $p_{i,\max}$. La stratégie est donc un contrôle stochastique en dimension n , **un contrôle par installation** : $(\pi_t)_{0 \leq t \leq T}$, $\pi_t = (\pi_t^1, \dots, \pi_t^n)'$, $\pi \in \mathbb{A}$ avec $\mathbb{A} = \{\pi \in \mathbb{R}^n; 0 \leq \pi_i \leq p_{i,\max}\}$, délimitant les capacités du portefeuille de production (charbon, gaz, fuel, nucléaire, hydro, vent, PV, ...)

En entrée du modèle, on considère le **prix spot de l'électricité** $(S_t, t \geq 0)$, dont la trajectoire évolue stochastiquement (avenir incertain), imprimant le caractère aléatoire au contrôle et aux sorties du modèle. Pour le moment, nous décrivons la dynamique du prix par un processus stochastique de type processus d'Itô, sans privilégier un modèle en particulier :

$$(3.1) \quad \begin{cases} dS_t^{\theta,s} = b(t, S_t^{\theta,s})dt + \sigma(t, S_t^{\theta,s})dB_t, \quad \forall t \geq \theta \\ S_\theta^{\theta,s} = s \end{cases}$$

- où b et σ sont des fonctions Lipschitz en s uniformément en t
- $(B_t, t \geq 0)$ est un mouvement brownien.
- **En sortie du modèle**, on obtient, à partir du contrôle (π_t) , décidé à chaque instant $t \in [0, T]$
- **l'émission cumulée de GES** ($eqT CO_2$), \mathcal{E}_t^π , dont la dynamique se déduit du contrôle et des taux d'émission instantanée de GES par installation :

$$d\mathcal{E}_t^\pi = \sum_{i=1}^n \underbrace{\left(\int_0^{\pi_t^i} \alpha_m^i(p) dp \right)}_{\alpha(\pi_t)} dt, \quad \mathcal{E}_0 = e$$

A la fin de la période de gestion, le producteur paie une pénalité, fonction de ses émissions de CO_2 :

$$PENALITE = \mathcal{T}(\mathcal{E}_T^\pi - \Theta_0)$$

où Θ_0 est la quantité de quotas de CO_2 initialement détenue par le producteur.

La fonction de pénalité $\mathcal{T}(\cdot)$ est croissante positive et nulle sur \mathbb{R}_- .

– **la richesse W_t^π du producteur**, dont la dynamique se décrit par

$$\begin{cases} dW_t^{\pi;\theta,w,s} = \underbrace{\left\{ (\pi_t \cdot \mathbb{1} - Q_t^{OTC}) S_t^{\theta,s} + Q_t^{OTC} \mathcal{P}_v(t) - C(t, \pi_t) \right\}}_{h(t, S_t^{\theta,s}; \pi_t)} dt, \\ W_\theta = w \end{cases}$$

où le coûts de production se déduit du contrôle et des coûts de production marginaux instantanés (déterministes) : $C(t, \pi) = \sum_{i=1}^n \int_0^{\pi^i} C_m^i(t, p) dp$, qui synthétisent les coûts de production (combustible, entretien, usure...) par installation, et où on a noté Q_t^{OTC} la part contractuelle de production vendue au prix $\mathcal{P}_v(t)$ (déterministe). Le producteur a accès au marché day-ahead d'électricité sur lequel il peut vendre ou acheter de l'électricité au prix S_t , s'il estime que c'est plus avantageux que de produire lui-même. On supposera le producteur toujours en mesure de fournir lui même la puissance Q_t^{OTC} .

– **Les paramètres déterministes sont**

- Θ_0 : l'allocation initiale ($t = 0$)
- $\mathcal{T}(\cdot)$: la fonction de pénalité, croissante.

Le prix d'indifférence : à partir d'un critère d'optimalité (en moyenne sur l'incertitude), on définit le processus de contrôle optimal π^* dans un environnement incertain comme celui qui réalise l'égalité :

$$\mathbb{E} [\mathcal{U}(W_T^{\pi^*})] = \sup_{\pi} \mathbb{E} [\mathcal{U}(W_T^{\pi})]$$

où \mathcal{U} est la fonction d'utilité du producteur qui permet de classer ses préférences. En toute généralité, la fonction d'utilité est strictement croissante et concave. Un exemple (classique et très utilisé) est la fonction d'utilité exponentielle de paramètre ρ :

$$\mathcal{U}(x) = -\exp(-\rho x), \quad x \in \mathbb{R}.$$

Si \mathcal{P} désigne le prix pour q permis achetés/vendus à la date 0, on considère d'une part la fonction valeur d'une optimisation de la production sans achat/vente de permis :

$$v(t, w, e) = \sup_{\pi^t \in \mathcal{A}} \mathbb{E}_{\{W_t=w, \mathcal{E}_t=e, S_t=s\}} \left[\mathcal{U} \left(W_T^{\pi^t} - \mathcal{T} \left(\mathcal{E}_T^{\pi^t} - \Theta_0 \right) \right) \right]$$

D'autre part, en achetant/vendant q permis à la date 0, au prix \mathcal{P} , la fonction valeur de l'optimisation de la production devient ³² :

$$v(0, w - q\mathcal{P}, e - q, s) = \sup_{\pi^0 \in \mathcal{A}} \mathbb{E} \left[\mathcal{U} \left(W_T^{\pi^0; t, w, s} - q\mathcal{P} - \mathcal{T}(\mathcal{E}_T^{\pi^0; t, e} - q - \Theta_0) \right) \right]$$

où le taux d'actualisation est négligé dans la formule ci-dessus pour simplifier les écritures.

Le prix d'indifférence $\mathcal{P}_{CO_2}^*(q)$ est tel que

$$(3.2) \quad \boxed{v(0, w - q\mathcal{P}_{CO_2}^*(q), e - q, s) = v(0, w, e, s)}$$

32. en remarquant que

$$\begin{aligned} W_r^{\pi; t, w-w', s} &= W_r^{\pi; t, w, s} - w', \quad \forall r \in [t, T] \\ \mathcal{E}_r^{\pi; t, e-e'} &= \mathcal{E}_r^{\pi; t, e} - e', \quad \forall r \in [t, T] \end{aligned}$$

Outre certaines situations particulières où le prix d'indifférence est calculé explicitement, dans le cas où l'environnement est incertain, une équation de Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) est établie pour le calcul de la fonction valeur v .

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial t} + b(t, s) \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\sigma(t, s)^2}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} + \sup_{\pi \in \mathcal{A}} \left\{ h(t, s; \pi) \frac{\partial v}{\partial w} + \alpha_m(\pi) \frac{\partial v}{\partial e} \right\} = 0 \\ v(T, w, e, s) = \mathcal{U}(w - \mathcal{T}(e - \Theta_0)) \end{cases}$$

Ou encore, en considérant l'opérateur \mathcal{H}

$$\begin{aligned} \mathcal{H}(t, x, p, M) &= \frac{1}{2} \text{Tr}(\Sigma \Sigma^t M)_{(t, x)} + \sup_{\pi \in A} \{\lambda(t, x, \pi) \cdot p\} \\ \Sigma(t, x) &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma(t, x_3) \end{pmatrix} \quad \lambda(t, x, \pi) = \begin{pmatrix} h(t, x_3; \pi) \\ \alpha_m() \\ b(t, x_3) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$(3.3) \quad \boxed{\partial_t v + \mathcal{H}(t, x, D_x v, D_x^2 v) = 0, \quad \forall (t, x) \in [0, T[\times \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}_+^*}$$

Nous (M. Bossy en l'occurrence) avons vérifié le caractère bien posé de l'équation de HJB (3.3) pour un modèle de prix spot d'électricité comme en (3.1), avec b and σ Lipschitz uniformément en temps, \mathcal{T} à croissance linéaire, $v(t, w, e, s) = o(\exp(C(2 + |w| + |e|)))$ et

$$\begin{aligned} \exists \kappa, \quad |b(t, s)| &\leq \kappa(1 + s) \\ |\sigma(t, s)| &\leq \kappa(1 + \sqrt{s}), \quad \forall s > 0. \end{aligned}$$

l'équation d'HJB nécessite une résolution numérique pour laquelle un code de calcul a été développé par nos partenaires spécialistes du contrôle stochastique, dans un code dédié dénomé **CarbonQuant** dans une version non encore rendue publique et sur la forge INRIA.

La résolution permet de répondre quantitativement aux questions du type :

– Existe-t'il un prix d'indifférence non trivial $\mathcal{P}_{CO_2}^* < \tau$?

Si oui, nous nous proposons d'évaluer

- quelle est sa sensibilité au dimensionnement
 - de la pénalité \mathcal{T} ?
 - de l'allocation initiale Θ_0 ?
- Quelles sont les émissions cumulées associées à l'achat/vente de quotas ?

Il permet de donner des courbes de prix d'indifférence en fonction du prix spot initial de l'électricité, pour différentes valeurs initiales de cumul d'émissions (les valeurs négatives représentent les volumes de quotas non utilisés), ou en fonction du volume de permis achetés/vendus à l'instant initial.

Chapitre 4

L'approche prospective, socle d'une démarche pour le long terme

Alors que l'approche optimale basée sur le prix d'indifférence nous a conduit à des développements sur le court terme¹, rappelons que la question du carbone est centrale lorsque la discussion se focalise sur les agendas politiques et que pays et régions se préoccupent des changements climatiques. Dans ce cas, il devient nécessaire d'explorer un horizon temporel de plusieurs décades, dans une toute autre dynamique.

Aussi fallait-il pouvoir envisager une approche adaptée pour élaborer une vision du futur et construire des stratégies pour le long terme. La démarche prospective apporte un canevas naturel à ces réflexions. Nous allons rappeler quelques uns de ses fondamentaux, préciser comment nous avons décliné une approche optimale dans ce nouveau cadre, avant de revenir sur quelques-une de nos contributions.

L'approche prospective

C'est à Gaston Berger que l'on doit les fondements de la discipline prospective que certains² qualifient de "science de l'homme à venir" et que d'autres apprécient comme une "indiscipline" intellectuelle.

Pour caractériser cette approche, destinée à éclairer l'avenir afin de le construire, nous en proposons quelques éléments d'appréciation, relevés dans les textes publiés entre 1955 et 1965 par G. Berger et P. Massé [3] :

1. la prospective se différencie de la prévision :

Dans les *disciplines "prospectives"*, [...] l'idée classique de "prévision" se trouvera complètement transformée. Si l'on compare la réflexion qui doit précéder toute action à celle d'un joueur d'échecs, mesurant ses possibilités et anticipant les réactions de l'adversaire, il faut dire que, dans le jeu que nous avons à jouer aujourd'hui, les règles se

1. le temps d'une phase du marché carbone, 2 à 5 ans

2. P. Durance dans la préface de [3]

*modifient, les pièces changent de nombre et de nature au cours de la partie.*³

2. la prospective se différencie de l'extrapolation :

La condition pour projeter quelque lumière sur l'avenir est de ne pas se réduire à l'extrapolation de l'existant, *comme si les directions prises au moment présent étaient l'expression exacte de ce que nous voulons vraiment. Si, comme les individus, les sociétés sont fréquemment déçues, c'est qu'on leur offre ce qu'elles demandent et non ce qu'elles désirent véritablement, sans savoir l'exprimer de façon adéquate.*⁴

3. la prospective est à la fois une attitude et une méthode :

Pascal avait un sentiment [...] juste de notre condition lorsqu'il écrivait en phrases brèves, pressantes comme la vie elle-même : "Il faut parier ; cela n'est pas volontaire ; vous êtes embarqué." [...]

*La Prospective est née de la rencontre de cette nécessité et de ces échecs. C'est d'abord une **attitude** qui refuse tout aussi bien la croyance aveugle que le scepticisme paralysant. C'est ensuite une **méthode** qui cherche à se définir par rapport à la Prévision. Voir loin, voir large, analyser en profondeur, prendre des risques, penser à l'homme, tels sont les caractères par lesquels Gaston Berger a tenté de la distinguer.*⁵

4. la prospective éclaire sur les fins et les moyens :

*A première vue le problème paraît simple. Il y a en somme deux choix à faire : un premier entre les fins à atteindre, un second entre les moyens à employer. La fin à atteindre doit être fixée par la politique, les moyens à employer dépendent de l'avis des techniciens.*⁶

5. la prospective prépare à l'action :

La prospective regarde en avant. Le regard est pour elle le premier temps de l'action [48].

Les premières déclinaisons de cette approche furent, au sortir de la seconde guerre mondiale, la planification et la reconstruction nationale.

Sous l'aiguillon de la question climatique et de la globalisation économique, les dossiers de l'énergie ont été l'occasion d'un renouvellement de cette tradition prospective pour lier : la prospective numérique, le calcul économique, l'économie publique et la réflexion stratégique. C'est dans cette démarche, élaborée via une approche basée sur des modèles de prospective long terme dérivant d'un paradigme optimal, que nous nous sommes inscrits. Nous allons expliciter en quoi elle hérite d'une longue tradition associant modèles et questions de prospective.

Histoire d'une modélisation pour le long terme

L'ambition de la modélisation prospective est de fournir des outils de cohérence dans le dialogue entre les décideurs, les experts et les scientifiques. Il ne s'agit pas de prédire le long terme ou d'en définir de manière normative les traits, mais d'apprécier, suivant la formule de

3. Extrait de l'homme et ses problèmes dans le monde de demain. Essai d'anthropologie prospective. G. Berger. 1955. p33.

4. Extrait de L'avenir des sciences de l'homme. G. Berger. 1956. p39.

5. Extrait de Prévision et Prospective, P. Massé, 1959, p100.

6. Le problème des choix : facteurs politiques et facteurs techniques. G. Berger. 1956. p41.

Pierre Massé, « un souhaitable qui apparaisse plausible à l'esprit prospectif et qui devienne probable pour l'esprit attaché à sa réalisation ».

Et, face à la complexité du nouveau contexte énergétique, les conséquences des choix stratégiques sont difficilement appréciables à l'aune des méthodes traditionnelles et les outils de modélisation, d'optimisation et d'aide à la décision deviennent des alternatives nécessaires afin d'en estimer les impacts.

Pour comprendre comment s'ouvrent ou se ferment les marges de manoeuvres futures pour nos sociétés, nous avons adopté des outils de modélisation et d'aide à la décision aux interfaces économie - ressources - climat, fondés sur la famille des modèles technico-économiques (type MarkAl (Market Allocation)[28] dont une version améliorée est TIMES (The Integrated MarkaL EFOM System).

Ils s'intègrent dans la lignée des modèles initiés par les recherches de la Cowles foundation [31]. Cette fondation, issue d'une commission créée par Alfred Cowles après la crise de 1929, a la vocation de rapprocher l'économie des sciences exactes par une utilisation systématique des mathématiques. A partir des années 1970, ses travaux sont renforcés par la fructification d'échanges via un réseau d'économistes et de mathématiciens autour de :

- G. B. Dantzig et son équipe du Stanford Optimization Laboratory,
- T. C. Koopmans et une partie des membres de la Cowles,
- Alan Manne et William Nordhaus qui résident à l'IIASA (International Institute for Applied System Analysis).

L'histoire [49] du déploiement des modèles remonte donc aux années 1930, lorsque les progrès de la représentation des flux en économie vont faire évoluer les descriptions de type Leontief vers le formalisme de l'analyse d'activités. Ce formalisme permet d'introduire une représentation de l'univers de la production en économie sous une forme logico-atomistique : des associations de processus qui “consomment” ou “produisent” des biens.⁷

Un système complexe réel correspond alors à un assemblage de multiples processus unitaires, assemblage qui vérifie une règle simple : tout ce qui est consommé doit avoir été produit. Il y a donc “productions jointes” car on produit à la fois des objets et des déchets, il y a aussi “alternatives de production” car un même objet peut être produit par différents processus. C'est une double généralisation des formalismes “à la Leontief” (en matrices rectangulaires et non plus carrées) pour reprendre Dantzig.

De ce formalisme, né le modèle de l'analyse d'activités “A model of general equilibrium” publié par von Neumann en 1937 qui révolutionne l'économie mathématique en introduisant

1. un modèle de croissance à horizon infini
2. un schéma descriptif qui repose sur une représentation atomistique de la production via l'analyse d'activités
3. la preuve de l'existence d'équilibre qui utilise des techniques mathématiques paradigmatiques de l'optimisation : théorème du point fixe, topologie, dualité, point selle, min-max, ...

7. Remarquons que cette notion de processus renvoie également : à la théorie des jeux qui transforme un état en un autre, aux événements discrets de la machine de Turing avec lecture/écriture séquentielle de la bande ou aux structures d'événement des “automates” de von Neumann.

De ce modèle dérive le modèle de von Neumann-Sraffa qui adopte une représentation de l'économie basée sur une analyse d'activités très désagrégée : les différents processus technologiques sont représentés explicitement. Ces processus permettent de visualiser les biens qui sont consommés et ceux qui sont produits en faisant intervenir les flux physiques de matières premières et d'énergie. Cette représentation permet également de prendre en compte les productions jointes et les différentes alternatives de production pour produire un bien de manière explicite.

En parallèle, dès 1928 Ramsey cherche à résoudre la question suivante : "...how much of its income should a nation save?". Il adopte une représentation de l'économie globale à partir d'un nombre restreint de variables agrégées : le capital K , le travail L , les matières premières M et l'énergie E . Le modèle représente les flux à partir d'un équilibre général calculable qui réalise une trajectoire de croissance optimale (au sens du bien être social).

Ces deux modèles, qui diffèrent dans leur représentation de l'économie, ont néanmoins en commun de reposer sur un paradigme d'optimisation et supposent un sentier de croissance optimal et/ou des anticipations parfaites des prix et des besoins futurs. Beaucoup de modèles utilisés dans le contexte de la prospective long terme aujourd'hui dérivent de l'une ou de l'autre de ces approches. Ainsi :

- les modèles **top-down** (ou approche descendante) dérivent du modèle de Ramsey : en référence au cadre général précédent, cette famille de modèles s'attache à expliciter les liens entre l'énergie et l'activité économique. Les méthodes employées s'appuient sur différentes disciplines économiques : macroéconomie, économétrie, microéconomie. L'appellation "top-down" traduit une perception du système énergétique à partir d'un nombre réduit de variables économiques agrégées. Les contraintes budgétaires et des préférences déterminent les choix de consommation des ménages. Pour le secteur productif, le capital (K), le travail (L), l'énergie (E) et les matières premières (M), sont les principaux facteurs qui déterminent le niveau de production des entreprises. Un modèle économique (KLM ou KLME suivant que l'énergie est un facteur indépendant ou non) représente alors différentes formes d'interactions (substitutions et/ou complémentarité de type ex ante et/ou ex post) entre ces facteurs. Les technologies sont ici représentées implicitement par des combinaisons différentes de ces facteurs.

Le modèle DICE (Dynamic Integrated Climate-Economy) de William Nordhaus (à partir de 1970 jusqu'à aujourd'hui dans sa dernière version [59]) fait partie de cette famille.

- Les modèles **bottom-up** (ou approche ascendante) dérivent du modèle de von Neumann-Sraffa (1930) : si l'on se réfère à nouveau au cadre global de l'analyse énergétique, l'approche ascendante s'intéresse aux composantes techniques du système énergétique. L'appellation "bottom-up" traduit une perception du système énergétique à partir d'un grand nombre de variables technologiques ; les données technologiques désagrégées, sont progressivement agrégées pour traduire les choix énergétiques de chaque catégorie d'agent. On partira ici du nombre et du type de technologies utilisées, ainsi que des caractéristiques techniques d'utilisation pour définir la consommation d'énergie de chaque acteur ou secteur. Les flux d'énergies dépendent des technologies mises en oeuvre. A partir de la production et/ou de la consommation énergétique de chaque technologie, la consommation totale est déterminée par la somme sur toutes les technologies utilisées et pour tous les usages des quantités d'éner-

gie produites et consommées. Cette classe de modèles représente ainsi les technologies de manière explicite dans les différents secteurs d'offre et de demande d'énergie à travers un secteur énergétique désagrégé. Les méthodes utilisées pour ce type de modèles se différencient par la complexité numérique : la taille et le nombre de sous secteurs, les choix de méthodes de résolution.

Les modèles de la famille MarkAl/TIMES développés à la suite des travaux d'Alan Manne dérivent de cette approche.

Le modèle MarkAl

MarkAl est un formalisme d'optimisation développé sous l'égide de l'Energy Technology Systems Analysis Program de l'Agence Internationale de l'Energie au début des années 1980 pour examiner l'impact sur le long terme des technologies (de production, de transformation et de demande) dans le secteur de l'énergie. Alors que la décennie 70 a vu l'émergence de modèles globaux [68],[18], [19], [1] dans lesquels les questions posées étaient d'évaluer le bien fondé de la croissance économique [55], le retour à la modélisation sectorielle plus pointue s'opère dans les années 80 : des méthodes qui avaient commencé à se développer avec la crise de l'énergie (1973) se prolongent avec les premières expériences de modélisation dans le domaine de l'énergie et du changement climatique et c'est le cadre dans lequel MarkAl est développé. C'est un modèle d'optimisation qui propose une approche technologique du secteur énergétique et permet de créer une économie virtuelle où différentes technologies sont mises en concurrence. Il s'agit concrètement d'une formulation explicite des relations input-output pour chaque technologie qui minimise, sur l'horizon choisi (typiquement 30 à 100 ans) et pour une demande finale donnée, le coût global actualisé du système, pour fournir les décisions en terme de choix de niveaux d'activités des technologies (énergie) et d'investissements en capacité (puissance installée).

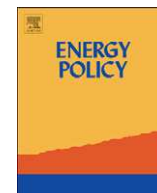
Ainsi, analyser les principaux déterminants du système énergétique à une échelle régionale donnée, anticiper les évolutions et les impacts des prix des énergies à court et moyen terme, estimer les émissions de polluants sont autant d'enjeux qui peuvent se résoudre via ce modèle technologique de la chaîne énergétique suffisamment agrégé pour intégrer les stratégies proposées et suffisamment détaillé pour prendre en compte les contraintes techniques et environnementales.[42]

C'est dans cette logique que l'approche long terme a été déclinée sur la valeur carbone dont nous rappelons tantôt qu'elle était centrale pour les discussions liées aux enjeux des changements climatiques. Ainsi, nous avons pu [2] explorer (au sens prospectif) et quantifier (au sens de l'analyse de la sensibilité) pour la France, l'évolution dynamique de la valeur carbone, sur plusieurs décades, à l'aide d'un modèle MarkAl-France que nous avons développé.

Valeur carbone long terme L'évolution de la valeur carbone est évaluée à l'aide d'une optimisation inter temporelle, la période de base étant de 5 ans, et permet d'accéder à différentes valeurs liant les activités et capacités des technologies produisant de l'énergie, aux émissions associés et ainsi d'inférer sur une valeur carbone restituant les impacts de ces choix. Nos résultats se situent dans la fourchette supérieure des valeurs données par d'autres

approches, à d'autres échelles, mais recouvrant notre zone d'étude. On montre également que la valeur carbone française établie par le rapport Quinet [61] correspond à une combinaison d'hypothèses optimistes. Notre estimation centrale est 4 fois supérieure à la valeur de 2050 et 14 fois supérieure en 2020, ce qui reflète les inerties de court terme, coûteuses. Nous déterminons également que cette valeur est très sensible aux objectifs intermédiaires, et comment elle varie au cours du temps.

Approche et résultats sont développés dans la publication suivante.



Carbon value dynamics for France: A key driver to support mitigation pledges at country scale[☆]

Edi Assoumou*, Nadia Maïzi

Centre for Applied Mathematics, MINES ParisTech, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 May 2010

Accepted 21 April 2011

Available online 10 May 2011

Keywords:

Long-term planning

Carbon value

MARKAL-TIMES models

ABSTRACT

The climate agenda in France and several other countries is a complex combination of unilateral commitments with regional and international objectives. When analyzing national policies, the findings of worldwide analyses are of limited accuracy and the large aggregates on which they are built level out most local specificities and inertia. Specific assessments are hence needed. This paper quantifies the dynamic evolution of carbon values for French climate and energy policy. Its time dependency over successive periods and the effects of setting intermediate targets are evaluated using a long-term optimization model. Addressing critical issues for France, we produce consistent energy, emissions and carbon value estimates with a 5-year time step. Our results are situated above the upper range of carbon value estimates of world models with an overlapping zone. We show that the official policy guideline value is only consistent with an optimistic combination of assumptions. The central estimates are 4 times greater than the guideline carbon value for 2050 and up to 14 times greater in 2020 because of short-term inertia that are costly to move. We also find that with intermediate objectives, the carbon value's dynamic is more than a simple upward curve and that its variability is itself time dependent.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The climate change debate has gained increasing visibility and acceptance, to become a major international coordination issue. During this process, analysis from world-scale models done within or outside the four IPCC assessment reports has played a decisive role in highlighting possible long-term impacts on ecosystems and economies as well as mitigation options.

The first significant lesson that can be drawn from these world models is that we are all in the same situation, i.e. on an unsustainable path. Our options are basically: mitigation of emissions and adaptation to impacts. The second lesson is the very large-scale availability of technically mature efficiency gains and mitigation options: advanced thermal power plants, switching from coal to gas, carbon capture and sequestration in electricity, and the use of renewable fuels. This increasing awareness is the basic force behind international initiatives, such as the Kyoto protocol, the EU energy and environmental package, and post-2012 negotiations on an international cooperation mechanism. It is also reflected at national level in several unilateral objectives

that have been set for the longer term up to 2050 (Germany, United Kingdom and France).

However, the seemingly undisturbed course that takes us from global awareness, key lessons and necessary action, towards the effective implication of countries is strongly tempered by the lukewarm outcomes of international summits and negotiations. Difficult decisions on issues such as the levels, nature and timetable of actions to be taken, responsibility (who pays, when, why and how), obligations and governance issues are reminders that countries are the key strategic nodes where convergence often ends.

Climate agendas at country scale are complex combinations of countries' own unilateral commitments with regional and international objectives. The policy framework in France is for instance defined by the Kyoto protocol, the EU climate package and a national energy law. World-scale analyses have provided useful macroscopic insights to decision makers. They must be relayed by more precise assessment for better-informed decisions and negotiations at country level. Simplified views of national circumstances in world-scale assessments are often a necessary caveat for tractability, but failing to include local specificities and limitations may lead to biased estimates of mitigation potentials or carbon costs. This paper discusses the long-term climate agenda for France and the related dynamic of the carbon value indicator. Section 2 situates our approach in the carbon valuation area and describes the current policy guideline method proposed for public investment choices for France. The analysis is performed using

[☆]This research was supported by the Modeling for sustainable development Chair, led by MINES ParisTech, Ecole des Ponts ParisTech, AgroParisTech, and ParisTech, supported by ADEME, EDF, RENAULT, SCHNEIDER ELECTRIC and TOTAL.

* Corresponding author.

E-mail address: edi.assoumou@mines-paristech.fr (E. Assoumou).

TIMES-FR, a long-term energy-planning model for France. Section 3 details the model's characteristics and the main hypotheses. The variability induced by more restrictive local conditions, the time dependency of carbon values across successive periods and the effects of introducing intermediate targets are analyzed. Issues such as nuclear power, carbon capture and storage (CCS), biofuels, intermediate targets and demand responsiveness are critical at local level. They are explicitly analyzed to outline a set of less than ideal conditions. The simulated scenarios and results are then presented in the fourth section, before a conclusion in the last section.

2. Values of carbon

The value of carbon synthesizes the monetary value of one additional ton of carbon or carbon equivalent released into the atmosphere at a given time. It is a useful indicator in the comparison of environmental strategies and many estimates of it have been produced using different approaches. From abundant literature on the subject, we highlight here key elements that help situate the approach followed in this case study.

2.1. Methods and range

2.1.1. Long-term estimates

Attributing a long-term value to carbon is usually done by focusing either on a monetary evaluation of the effects of a changing climate on manmade and natural systems, or the costs of achieving specified mitigation targets. The long-term carbon values that have been published vary widely.

Social cost approaches define a marginal damage cost of carbon (Clarkson and Deyes, 2002; Pearce, 2003; Kuik et al., 2008). For a given year, this cost is computed by increasing the emission profile by one ton and then assessing the incremental damage. Damage functions are hence required, and changes are expressed in relation to a given reference damage, which is itself calculated for a reference concentration profile (commonly a doubling of concentration by 2050). A statistical analysis of the range of social costs of carbon can be found in Tol (2005) based on 103 estimates, and in a non-peer-reviewed update based on 211 estimates (Tol, 2007). The reported mean values are around 20 €/tCO₂ and the standard deviations are more than twice as high, at 46 €/tCO₂ and 56 €/tCO₂ for the 2005 and 2007 analyses, respectively. The reported key explanatory factors are discount rates, cross-country aggregation methods, and distinctions between peer and non-peer reviewed papers.

When mitigation targets are considered, cost effective methods are applied. They measure the cost of the set of actions that need to be taken to reduce a specified mitigation goal by one ton of carbon in the chosen year. Publicized by the Kyoto protocol, this approach is now pushed by post-Kyoto negotiations or commitments on explicit mitigation targets, such as the EU energy and environment package, or country-specific objectives such as the 2004 French energy law and the United Kingdom's white paper. The number and range of estimates are also large. Kuik et al. (2009) performed a meta-analysis on 62 estimates of abatement costs for the years 2025 and 2050. For long-term scenarios in categories III and IV of the IPCC classification (Table 1), the reported mean value is 24.8 ²⁰⁰⁵€/tCO₂-eq in 2025 and 55.8 ²⁰⁰⁵€/tCO₂-eq in 2050 with standard deviations of respectively 27.9 ²⁰⁰⁵€/tCO₂-eq and 52.9 ²⁰⁰⁵€/tCO₂-eq. They also apply a meta-

Table 1
IPCC scenario characteristics in the Fourth Assessment Report Working Group 3 (IPCC, 2007).

IPCC categories	Global CO ₂ reductions in relation to 2000	CO ₂ -eq (ppm)	CO ₂ (ppm)
I	–85% to –50%	445–490	350–400
II	–60% to –30%	490–535	400–440
III	–30% to +5%	535–590	440–485
IV	+10% to +60%	590–710	485–570
V	+25% to +85%	710–855	570–660
VI	+90% to +140%	855–1130	660–790

regression to address a target of 450 ppm CO₂eq (category I) and predict higher values of 129 ²⁰⁰⁵€/tCO₂-eq (between 69 and 241 €) for 2025 and 225 ²⁰⁰⁵€/tCO₂-eq (between 128 and 396 €) for 2050.

At world scale, the 2008 Energy Technology Perspectives (IEA, 2008) also report costs² of between 42 ²⁰⁰⁵€/tCO₂ and 83 ²⁰⁰⁵€/tCO₂ if emission levels are limited to current levels in 2050 (category III) and between 167 ²⁰⁰⁵€/tCO₂ to 417 ²⁰⁰⁵€/tCO₂ when the target is a 50%reduction (category I or II). Both studies assume full geographical flexibility and no intermediate targets and cover different greenhouse gases. IEA (2008) considers energy-related CO₂ emissions only, while Kuik et al. (2009) include multigas studies.

2.1.2. Short-term estimates

In the short to medium term, the launch of the European Union's emission trading system (EU ETS), which is the largest carbon market (Convery et al., 2008), fostered market-based analyses of carbon value. Organized carbon markets synthesize in an operative indicator the outcomes of unrevealed participants' characteristics under given markets' trading rules. Stylized permit trading assumptions can of course be used in damage or abatement cost evaluation, but they say very little about how such markets would work practically, about participants' behavior, or how the price of carbon is set. For eligible industrial sectors, this is indeed the significant value in their short- to medium-term decision-making process.

Published works have not focused so much on the range of estimates, and three main issues can be outlined. The first is, understanding how a value is set in carbon markets by making analyses of the first 2005–2007 market period or using theoretical market models. Empirical analyses of historical data to construct an econometric price model from selected drivers are used in Alberola et al. (2008), Benz and Trück (2009), while Seifert et al. (2008) propose a theoretical stochastic CO₂ spot pricing model with a central planner. The second issue is the way this market value can subsequently affect specific market participants' positions or investment choices (Oberndorfer, 2009; Abadie and Chamorro, 2008). Finally, the last issue is the way in which other climate policy instruments link in with carbon markets. For instance, Böhringer and Hoffmann (2006) discuss the performances of a juxtaposition of ETS sectors, regulated sectors, and international carbon permits.

2.2. Carbon valuation in the French context

2.2.1. Energy and environmental targets in France

France is the world's fifth economy, the largest EU country, covering approximately one fifth of its total surface area, and the second most populated. It is centrally located and has 7 neighboring countries, which include the other 4 most populated EU

¹ The reference year is not specified: 2003 USD is assumed based on the latest publication date reported for studies reviewed. An exchange rate of 1.2 is also applied.

² Converted from 2005 USD with a 1.2 exchange rate.

countries. As illustrated in Fig. 1, however, the structure of its energy system clearly differs from EU or world aggregates:

- Its level of oil dependence is a strong similarity point regarding both primary energy supply and electricity production.
- The role of coal and nuclear power in the total primary supply, as well as in electricity production, appears to be a strong divergence point.
- Natural gas clearly diverges for electricity production and is relatively consistent for primary supply.
- The contributions of other sources are roughly consistent for electricity production but very different in terms of primary supply.

It is therefore not appropriate to directly translate findings resulting from studies of more aggregated levels. However, global and supra-national environmental targets need to be echoed at national levels. For France, connection between international and national levels is translated in the Kyoto protocol for 2010, the EU climate package for 2020, and its national target to quarter greenhouse gas emissions relative to 1990 levels by 2050. With a 4% reduction of its greenhouse gas emissions in 2006 compared to 1990, France is heading in the right direction to reach its Kyoto stabilization goal. The costs of the long-term targets represent a much bigger and less studied effort. In 2005 the energy orientation law endorsed the principle of a long-term division by four to five of greenhouse gases emissions for developed countries by 2050. In 2008, a specific energy commission (Syrota, 2008) advocated that France should divide energy-related CO₂ emissions by 2–2.5 for sole domestic actions. A new law – Loi de programmation Grenelle – was passed in 2009 setting France an overall target of quartering its greenhouse gas emissions in relation to 1990 levels by 2050.

2.2.2. French carbon value policy guidelines

Governments ultimately decide on committing nations to environmental policies. Under the rule of power, their chosen carbon values can be used as guidelines for public investment choices or as a basis for a carbon tax. In France, an initial assessment of carbon value was made in Boiteux (2001) a report on investment decisions and externalities in the transport sector. As proposed in this report, the theoretical framework for policy guidelines in France is an adaptation of Hotelling's valuation approach for non-renewable resources, which is in practice translated as a growth rate. A value of 200832€/tCO₂ in 2010 with a 3% yearly growth rate in the future was proposed.

This initial work based on experts' best guess approach was recently reviewed and generalized by a specific commission (Quinet, 2009). From 200832 €/tCO₂ in 2010, the new guideline value increases at a 5.8% annual rate, to reach a consensus value of 2008100 €/tCO₂ in 2030. The rate is then lowered to 4% (equal to the chosen discount rate) whereby a value of 2008200 €/tCO₂ is reached in 2050 with a proposed range of 150–350 €/tCO₂.

Policy guideline approaches are political by nature and the wide range of carbon values is highly unfortunate. A consensual value must be identified. The 2008100 €/tCO₂ consensus value for 2030 (Quinet, 2009) thus averages estimates from three top-down world model reporting values of 97, 58 and 150 €/tCO₂. Two general equilibrium models, GEMINI-E3 and IMACLIM-R, and a partial equilibrium model, POLES, were used to derive carbon values for the EU alone and for the world, assuming full international flexibility. The range of estimates across models, Table 2, is very broad and the 2050 value is significantly higher than the selected policy guideline value.

2.2.3. Methodology proposed in this case study

As illustrated in the above literature review, carbon valuation is a well-known and active area. But is it an old story or old science? Despite consensus that we must “think globally and act locally”, it is not a straightforward process to downscale findings from world or large regions to country scale. The leveling-out of differences in aggregated assessments neglects energy system inertia.

The GEMINI-E3 model (Quinet, 2009), for instance, suggests a 47% increase of nuclear electricity compared to today's levels in the EU, including France. Existing European nuclear plants will be fully decommissioned by 2050 even after life-time extensions. At this point in time, only two plants in Bulgaria, one in Finland and one in France are under construction; Italy and the United Kingdom have only expressed intentions to build new plants; and Germany and

Table 2

Carbon values from world economic models used in Quinet (2009).

2008€/tCO ₂	EU unilateral 60% in 2050			World 450 ppm		
	2020	2030	2050	2020	2030	2050
POLES	26	97	319	16	57	682
GEMINI-E3	25	58	446	13	42	339
IMACLIM-R	95	150	130	100	160	200
Average	49	102 (consensus value)	298	43	86	407

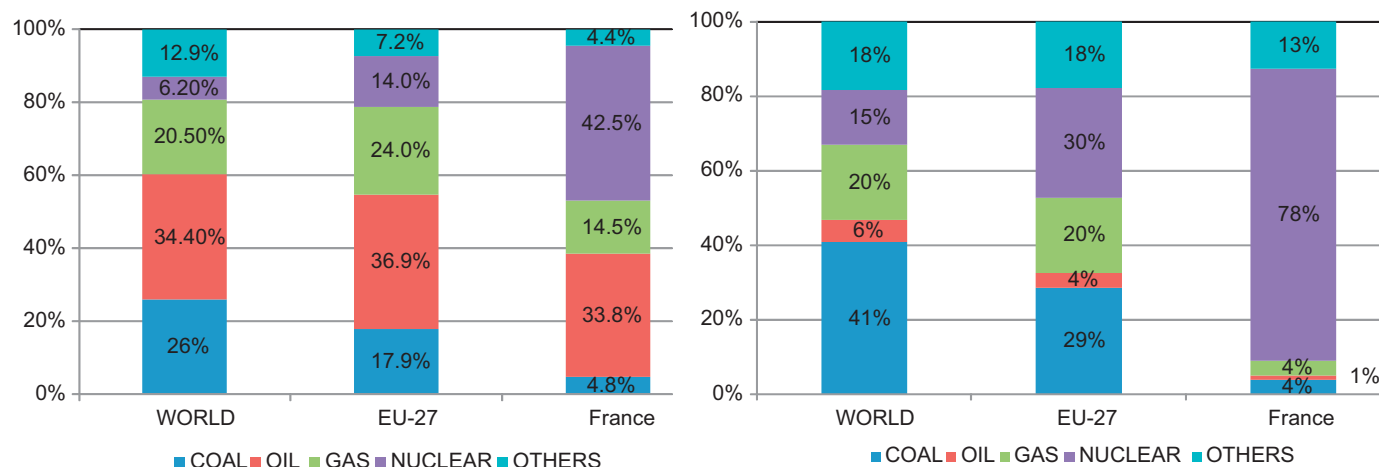


Fig. 1. Market share of primary energy supply (left) and electricity production (right) in 2006. Data source: IEA, EUROSTAT.

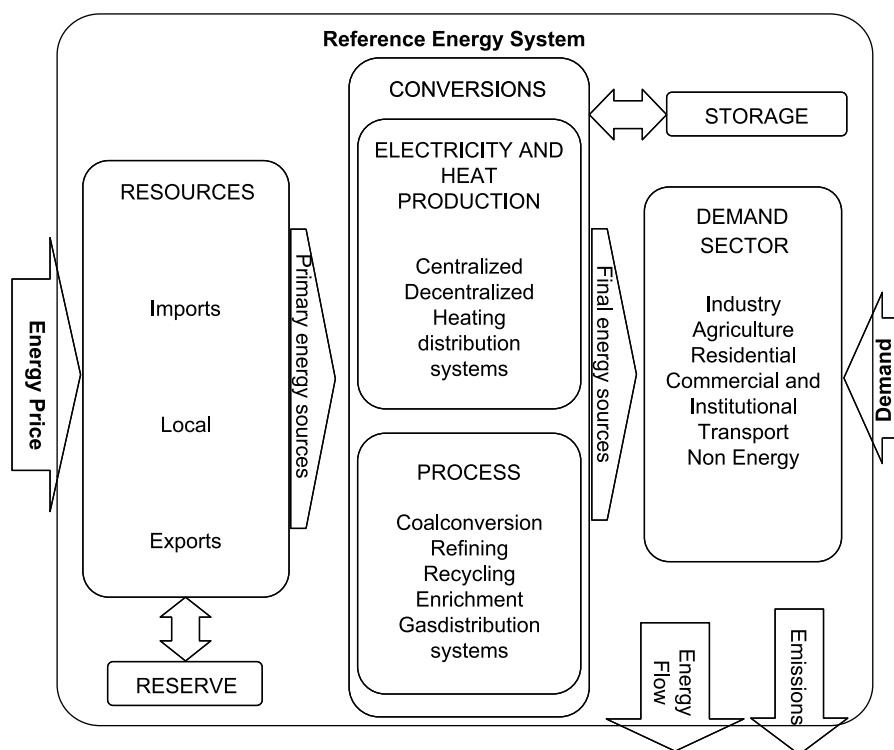


Fig. 2. The TIMES-FR modeling structure.

Spain have plans for nuclear phase-out. This 47% increase therefore implies more than an already questionable systematic replacement policy. The market share of nuclear power in European electricity production should increase from 30% today to 36% by 2020 and 41% by 2050. This is technically feasible in absolute terms but supposes very low inertia and implies that all countries will rapidly switch towards the French model.

Simulations from the POLES model suggest an alternative solution based on carbon capture and storage technologies, with a 2050 level slightly above one third of today's EU-27 emissions. In 2020 levels should be at 77 MtCO₂ per year, with 1118 Mt per year in 2050. Assuming the existence of sequestration plants with the same capacity as the Sleipner³ project in Norway, these levels correspond to 77 plants in 2020 and over a thousand in 2050. In practice, the EU's ambitious target is to have 12 demonstration plants built by 2020.

At a more global scale, the carbon values resulting from top-down models reported in the latest IPCC assessment report (IPCC, 2007) also vary strongly for mitigation scenarios in categories I and II. The MERGE model proposes a value of 192²⁰⁰⁰\$/tCO₂ in 2030 for a worldwide emission level of 47.2 GtCO₂-eq while the WIAGEM model's estimate is only 9²⁰⁰⁰\$/tCO₂ in 2030 for a global emission level of 43.1 GtCO₂-eq.

Although carbon valuation can be considered to be a well-known subject, there are still significant research interests in assessing less-than-ideal conditions. Our estimates are based on a bottom-up optimization model in an intertemporal optimization framework. This still involves representing decisions made by an ideal central planner. Under this framework, less-than-ideal conditions relate here to an energy system's inertia regarding technologies, trade and future demands. The approach is cost effective, and by assessing several estimates with explicit technical implications based on a single model, we obtain a broad picture of the

mitigation challenges. No similar work for France has been done to our knowledge. The issue of writing an intermediate target by 2020 into the long-term climate agenda is also discussed.

3. Assessment methodology and key hypotheses

3.1. The TIMES-FR model

This analysis is based on TIMES-FR, a bottom-up optimization model of the MARKAL/TIMES family of energy models (Berger et al., 1992; Loulou et al., 1996; Labriet and Loulou, 2008) that has been developed since the mid-1980s (Fishbone and Abilock, 1981) under the auspices of the International Energy Agency. The basic principle of the model is a large linear optimization of substitution possibilities in the energy system between explicit technologies and commodity flows under constraints. The TIMES-FR model is a TIMES model specifically developed to describe the French energy system. The way it works is illustrated schematically in Fig. 2. Exogenously specified prices for primary energy resources and sectoral demands (reference levels and respective price elasticities) are incorporated into a so-called reference energy system (RES), the central piece of the architecture. The RES concept materializes the sequential description of all the transformation steps, from initial access to primary resources; and the conversion towards secondary energy carriers, such as transport fuels, electricity or heat, to the supply of requested energy services.

The model's framework is technology-rich, with actual or envisaged transformation nodes explicitly described as technologies also producing and consuming explicit commodity flows (energy, materials, and emissions) throughout the RES. Two main mechanisms ensure that the structure remains consistent over successive time periods: (a) flow equilibrium conditions, which impose that for each flow represented production equals or exceeds consumption and (b) capacity transfer over time according to the commissioning date and lifetime of technologies.

³ The largest EU sequestration project with about 1 MtCO₂ sequestered per year.

Building on its detailed bottom-up architecture, the model maximizes the total discounted surplus over the period 2000–2050 in an intertemporal optimization framework. As a result of this optimization step, all non-zero variables in the solution quantify the levels of energy resources, emissions, and technologies that are effectively used from the total available set of possibilities modeled. This bottom-up approach is well suited to the detailed investigation of emission levels and technology choices as illustrated for instance in Blesl et al. (2007), Labriet et al. (2004) and Simões et al. (2008). Furthermore, thanks to the linear optimization framework, the dual value of any explicitly imposed constraint supplies its marginal value. This property will be used to derive the carbon value and include intermediate targets. The carbon value's level and evolution over time are endogenously determined. However, and because of the central planner and perfect foresight assumptions, such optimization frameworks are suitable for prospective analyses but cannot be interpreted as predictions.

Primary and final energy balances are calibrated on Eurostat data for the years 2000 and 2005. The detailed sector specific calibration is performed from French energy statistics and specific databases such as the SITADEL database for the building sector, as well as statistics from the French ministry for Ecology, Sustainable development, Transport and Housing. Further calibration of existing Power plants is done on the basis of the commercial World Electric Power Plants database from Platts.

3.2. Useful demand assumptions

3.2.1. Demand levels and disaggregation

Levels of useful energy service demands drive the achieved level of energy consumption and the associated technical choices in the model. TIMES-FR demands are disaggregated and expressed as a useful energy service demand instead of final energy consumption (Table 3). Substitution among end-use technologies to provide equal levels of service is endogenous.

The energy service demands are projected over the modeling horizon using bottom-up drivers to reflect lifestyle or societal choices, and gross domestic product to reflect economic activity. An average economic growth of 2% is assumed by 2020, decreasing to 1.5% in 2050. French demographic changes are based on 2050 projections from the French National Statistics Institute (Robert-Bobée, 2006). An increase from 60 million to 70 million between 2205 and 2050 is assumed. Other detailed specific assumptions are made regarding economic and societal variables made in Syrota (2008) and updated drivers for electricity demands for specific electric uses from the French electricity transmission system operator (RTE, 2009).

3.2.2. Elasticity

Energy service demands are determined in a partial equilibrium together with the associated production and transformation technologies. Driven by price changes induced by tighter constraints or scenarios, demands will depart from their reference levels. This demand response mechanism is implemented using own-price elasticity. Selecting a value for this parameter is a delicate operation. More thorough work on elasticity can be found in Bernstein and Griffin (2006) for multi-energy variability and regional differences in US regions or (in Espey and Espey, 2004) for residential electricity demand. Additional difficulties arise in the delicate estimation of past and current price elasticity when attempts are made to project them in the future. In this analysis, generic elasticity values of 0.2 for specific electric appliances and 0.3 for the other energy services are used.

Table 3
Demand disaggregation and drivers for TIMES-FR.

Demand sectors	Energy services	Drivers
Residential sector: House/ Apartment	Space heating Water heating Cooking Lighting Other electric appliances	Population Demolition rate Existing building stock characteristics New building regulation Square meters per capita Hot water demand per capita Equipment rate
Passengers mobility demand: short/long distance	Individual road transport Collective road transport Rail transport Domestic air transport International air transport	Population Average travel distance
Goods mobility demand	Road transport Rail transport Inland water Maritime bunkers	Modal split Economic activity:GDP
Tertiary	Space heating Water heating Cooking Specific electric appliances	Surface Economic activity: GDP
Industry	Iron and steel Non-ferrous metal Chlorine Ammoniac Other chemistry Pulp and paper Cement Glass Other industries	Economic growth: GDP
Agriculture	Aggregated output	

Furthermore, elasticity is strictly a local notion only applicable to small variations around the measurement point. Choices made on this issue are often not explicit in published results and there is thus an implicit assumption that elastic responses have no limits. As a consequence, elasticity can behave almost like a magic stick that makes any target reachable. Three approaches are specified here for the maximum elasticity-induced variations (maximum deviations from initial energy services): relatively inelastic demands with only 2% variation allowed by 2050, a 5% authorized variation before 2025 and 10% afterwards, and a 10% variation range before 2025 rising to 20%. Stronger demand responses are hence allowed for the long term.

3.3. Limits to available technical options

Carbon mitigation technologies exist but cannot be mobilized at any rate or period due to energy system's inertia. As outlined earlier, this is accentuated when granularity is lower. Nuclear power, carbon capture and sequestration (CCS) plants, and biofuel imports are considered in this study.

3.3.1. Nuclear power

Assuming an average operation time of 40 years, complete decommissioning of all existing 59 French nuclear reactors should be effective between 2020 and 2040. Only a maximum of 2 new

plants is foreseen for 2020 and future large-scale replacement is a key assumption. In 2004, the official scenario established by the former French directorate for energy and raw materials (DGEMP, 2004), assumed a maximum of 2 new reactors per year after 2020, leading to a maximum of 51 GW of total nuclear capacity in 2030 compared to 63.3 GW today. This development profile was modified in the 2008 update (DGEMP, 2008) in line with the new government's call for a stabilization of nuclear power contribution. A stabilization of total installed capacity at around 65 GW between 2020 and 2030 was then adopted. Extended over the modeling horizon, the central nuclear assumption for our analysis is a level of 65 GW. This upper boundary is relaxed in an alternative interpretation to a value of 92.8 GW, which corresponds to stability in the total number of reactors and increased unit reactor capacity.

3.3.2. Carbon capture and storage

Thermal power plants contribute little to total electricity production in France and are almost exclusively used for load following operations on the network. This reduces the relative interest of industrial development in France, and there is supposedly a preference for CCS know-how to be developed in countries that use high proportions of fossil fuels in electricity production and for base load operation. The short-term development prospect in France is low. Our central technological vision takes an upper boundary of 0.5 Mt on CCS in 2020 and 20 Mt CO₂ in 2050 for both the electricity and industry sectors. These upper limits are tripled in an alternative vision.

3.3.3. Biofuel imports

French forestland is the third biggest in Europe (Puech, 2009) and France is also the second highest consumer of solid biomass for energy purposes in the EU, consuming 8.5 Mtoe in 2007. The potential for further development of second generation biofuels is thus high. The central hypothesis adopted for this analysis is a reliance on the development of a domestic biofuel production industry. Imports of biofuels from the rest of the world are only authorized in a second case with a limit of 3 Mtoe, which corresponds to around 20% of the domestic potential considered.

The database from the NEEDS and RES2020 EU research projects are used as basis for technology characterization. Fig. 3 describes the assumed evolution of overnight construction costs for conventional and renewable plants. In recent years factors such as higher raw material (steel cement and others) costs, tight

engineering capacities for an increased number of projects, additional cost for first plants of a new type, have increased plants costs. This newly observed trend is not reflected here. A review of ongoing projects costs in the United States is done in Kaplan (2008). Natural gas combined cycles' costs for instance range from 500 to 1500 \$/kW for scheduled operation in 2010. Comparing the 2005 (OECD, 2005) and 2010 (IEA, 2010) editions of the "Projected Costs of Generating Electricity" publication leads to similar conclusions. The reported nuclear overnight construction cost was updated from 1500 to 3860 \$/kW for France mainly due to important delay with the Flamanville plant which is the first of the European Pressurized Reactor nature in France. Whether or not the currently observed costs increase will be a stable feature for the coming decades will of course impact the cost reduction paradigm adopted here.

3.4. Other assumptions

Only energy-related CO₂ emissions are considered in this analysis, and emissions from international air transportation and maritime bunkers are excluded in line with the Kyoto accounting methodology. The discount rate and fossil fuel prices used in the current analysis are chosen to be consistent with the guideline hypothesis in Quinet (2009). All carbon estimates are made with a 4% discount rate, which is the conventional discount rate for public investment appraisal in France (Lebegue et al., 2005). For fossil fuel imports, the exogenous price assumptions are, as in Quinet (2009), based on the World Energy Outlook 2007 with a continuation of the trend toward 2050 as outlined in Table 4. Finally a long-term euro/dollar exchange rate of 1.2 is taken.

4. Simulation and results

The TIMES_FR model is used to compute the energy system's responses to strict CO₂ mitigation policies under different conditions specified by scenarios. Highly consistent results concerning emissions, detailed energy choices and carbon values can thus be derived simultaneously.

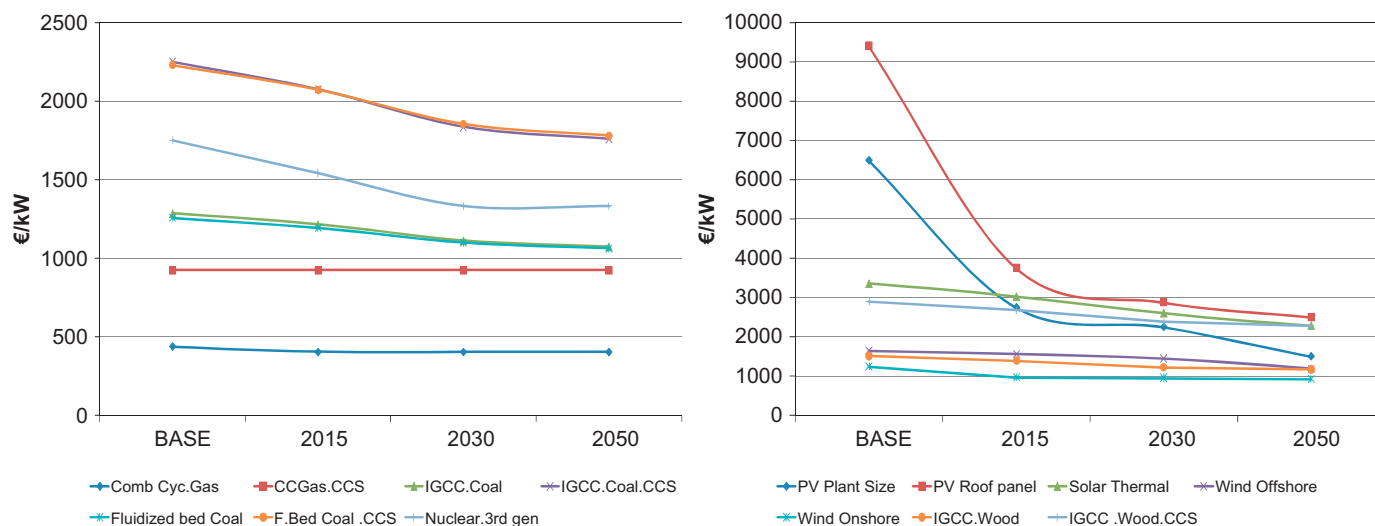


Fig. 3. Overnight power plants construction costs.

Table 4
Fossil fuel import prices.

in 2006 \$		2000	2010	2020	2030	2040	2050
(\$/boe)	Oil	31.4	59.0	58.7	62.0	65.3	68.7
(\$/MBTU)	Gas	3.2	6.6	6.9	7.3	7.8	8.3
(\$/ton)	Coal	37.5	56.7	57.2	61.2	64.0	66.9

4.1. Scenarios

A scenario with no abatement or demand policy is defined as the baseline for the comparison. Base-A scenario builds on the standard demand projection, taking an upper boundary of 65 GW on nuclear and a maximum contribution of 20 Mt for CCS by 2050. The imported energy prices are in line with the WEO 2007 and there are no biofuel imports.

A second scenario considers alternative organizational choices but without any explicit abatement policy. Base-B scenario describes strong political and organizational measures leading to modified demands of energy services in the building and transport sectors. In the building sector, the main measures are capital replacement (destruction and rate of new construction) as well as tighter regulatory requirements for new buildings and higher insulation potential. The average construction rate increases from 300 to 350 thousands houses per year before 2020 and from 200 to 240 thousands houses per year after. With an increase of the total number of dwellings from 25 to 35 million over the fifty year period, these construction rates are consistent with a doubling of the demolition rate of existing building stock from 0.2% to 0.4% annually. In the transport sector the key parameters are modal splits. Table 5 illustrates this approach for the transport sector. This demand measure approach is conceptually close to the sector-specific working groups instituted by the French government in the so-called “Grenelle de l’environnement” round-tables process.

All CO₂ mitigation cases are then constructed around a scenario ENV60-ref, where a reduction by 20% in 2020 and 60% in 2050 relatively to 1990 is explicitly imposed as a constraint to the operating conditions described in scenario Base-B. Elastic variations in this scenario are very slight (strongly marginal) and their amplitude is limited to 2% in 2050.

A group of 3 additional scenarios investigates technical options: ENV60-CCS, ENV60-Nuc and ENV60-Biof. Over the modeling horizon, the reduction profile is defined by the target's level in 2020 and a decrease at a constant rate towards a 60% reduction in 2050. The effect of endorsing lower intermediate targets in 2020 while keeping the same long-term goal is assessed in 2 additional scenarios: ENV60-Itar1 and ENV60-Itar2. Lastly, the range of elastic demand adjustments in 2020 and 2050 is considered in two scenarios: ENV60-Ela1 and ENV60-Ela2. Those various conditions provide a broad overview of the key environmental policy issues in France, which are still undetermined and can potentially affect the final carbon value and its dynamics. The ENV60-bestW scenario then depicts the most favorable combination of all options (Table 6).

4.2. Energy system's evolution

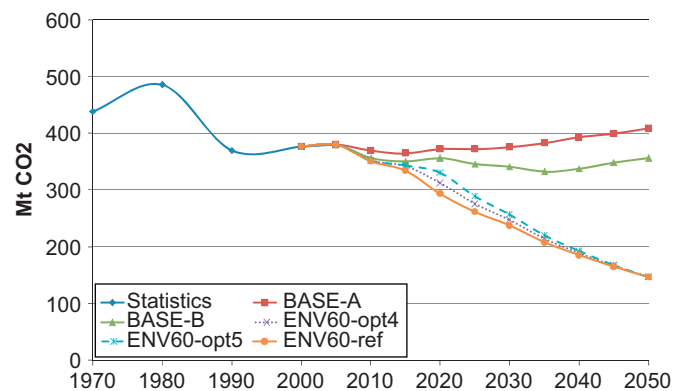
With rational decisions and an optimization framework, energy-related CO₂ emissions (Fig. 4) are projected to decrease slightly up to 2020 by 0.14% annually, and increase moderately by 0.31% per year thereafter as demand for energy services grows in the Base-A case. The level reached in 2050 is 10% above 1990 levels. Proactive organizational choices to influence the final demands for energy services in Base-B scenario are sufficient to

Table 5
Mobility services and modal splits.

Modal split	Base year	BASE-A: Reference demands		BASE-B: Organizational choices	
		2005	2025	2050	2025
<i>Passenger mobility</i>					
Personal vehicles (%)	81.2	81.0	79.0	76.7	74.4
Collective (%)	17.1	17.3	19.4	21.8	24.3
Air domestic (%)	1.7	1.7	1.6	1.5	1.3
<i>Good mobility</i>					
Road (%)	86.0	84.8	84.7	80.2	71.9
Rail (%)	11.7	12.8	12.8	16.5	24.5
Navigation (%)	2.3	2.4	2.5	3.4	3.6

Table 6
Alternative scenarios for a 60% reduction of CO₂ emissions.

Changes from ENV60-ref in 7 alternative scenarios also leading to a 60% reduction of CO ₂ emissions in 2050	
<i>Trade and technology</i>	
ENV60-CCS	Nuclear max 65 GW, max CCS at 40 Mt , biofuel import not allowed
ENV60-Nuc	Nuclear max 92.8 GW , max CCS at 20 Mt, biofuel import not allowed
ENV60-Biof	Nuclear max 65 GW, max CCS at 20 Mt, biofuel import allowed
<i>Smoother path: Intermediate target in 2020</i>	
ENV60-Itar1	Lower intermediate target 1:15% reduction in 2020
ENV60-Itar2	Lower intermediate target 2:10% reduction in 2020
<i>Demand responsiveness</i>	
ENV60-Ela1	Higher demand variations allowed 1:5% in 2020, 10% in 2050
ENV60-Ela2	Higher demand variations allowed 2:10% in 2020, 20% in 2050
<i>Most favorable combination</i>	
ENV60-bestW	Nuclear max 92.8 GW, max CCS at 40 Mt, biofuel import allowed, 10% CO₂ reduction in 2020, higher variations allowed Ela-2

**Fig. 4.** Evolution of energy-related CO₂ emissions for France.

curb the upward trend and induce a 3.6% reduction compared to 1990. This reduction is however far from the French long-term climate target, and only specific policies in the ENV60-type scenarios yield very low CO₂ levels in 2050.

What energy mixes will be consistent with these evolutions? In the Base-A case, the total primary energy supply (TPES) increases by 6% in 2020 and 18% in 2050 compared to 2006 levels. The mix remains structurally dominated by fossil fuels,

with an almost stable market share of 49% over the horizon against 52% today (Fig. 5). Nuclear power's market share remains around 42% and renewable energies increase their contribution from 6% to 9% in 2050 leading in absolute terms to a 60% increase over the horizon.

Alternative organizational choices are enough to reduce energy demand. In Base-B, the TPES increase is lowered to 2.6% in 2020 and 4.4% in 2050. This is enabled by an 8% absolute decrease of fossil fuel use compared to 2006, which is not compensated by the lower growths in the use of renewable sources and nuclear energy. However, fossil fuels still dominate the mix with a 46% market share.

There is only a 0.3% reduction in primary energy use between the BASE-B and ENV60-ref scenarios. A 60% reduction of energy-related CO₂ emissions can hence be achieved with only minor additional TPES reduction but strong adjustments in the mix. In 2050, the market share of fossil fuels drops to 30% while the contribution of renewable energies rises to 19% for the ENV60-ref scenario. Compared to their respective levels in 2006, this implies a 48% reduction in coal use, a 73% reduction in oil, and a multiplication by 3.2 for renewable sources. Unlike other fossil fuels, natural gas grows by 36%.

These results suggest a clear decoupling between CO₂ targets and energy consumption levels. This can be further illustrated by two other primary energy mixes in 2050 that are also compatible with the abatement objective. When more nuclear is allowed, primary energy use increases and is 6% higher than the 2050 mix in Base-B. With the more responsive energy service demand, ENV60-Ela2, a reduction of 8% is observed. In this case the contribution of renewable energy sources is lower than in ENV60-ref.

The strong reduction of fossil oil consumption implies significant adjustments in the transport sector. Internal combustion engines remain dominant with 73% of final fuel consumption, but oil to natural gas and oil to biofuels substitutions occur. The contribution of liquid fuels thus drops to 35% of final transport fuel consumption with 26% provided by first and second generation biofuels and 9% supplied by refined oil products. In addition natural gas and electricity's contribution increase respectively to 38% and 27%. This higher penetration of electricity also induces higher efficiency and energy savings (Fig. 6).

Important changes are also induced in the electricity sector and Fig. 7 shows that several electricity production systems are compatible with the climate target. Reducing emissions pushes

electricity demand up and only scenarios with a highly responsive service demand, ENV60-ELA1 and ENV60-ELA2, remain close to the non-CO₂ abatement cases. The increased new nuclear possibility in ENV60-NUC leads to the most electro-intensive future by far, while most other environmental scenarios are around 775 TWh in 2050.

To meet the climate target, green electricity's market share will have to increase from 12% in 2006 to around 20% in 2020 and 25–30% in 2050. Compared to today's levels, this represents for the different scenarios a challenging 30–60% growth in 2020 and a multiplication by 2.8 to 3.1 by 2050. Wind power is the main driver for this growth before 2020, followed by biomass toward 2050. Finally, we can also observe that even in the absence of climate policy, green electricity production in France could grow by 18% in 2020 compared to today's levels. These results (Table 7) show that for ambitious abatement goals, a strong development of renewable electricity is robust, even with a stronger CCS or nuclear policy. CCS could represent as much as 38% of fossil electricity production in 2020 and 87% in 2050. A lower intermediate target or higher demand responses could, however, limit its contribution to around 5% in 2020 and 60% in 2050. For nuclear power it is interesting to note that, due to an increase in electricity use, its market share in 2050 stays close to the no abatement scenarios at around 75%, even with the ENV60-NUC scenario. Without this, its contribution could drop to 65% by 2050.

4.3. Carbon values

There is no single technically feasible primary energy mix or electricity mix that can meet the climate and abatement targets. Though feasible, the above energy system evolutions are not equivalent in terms of the implied level of effort, and the usefulness of a synthetic cost indicator such as the carbon value is obvious. When caps on the emission pathway are applied, the level and dynamic evolution of the carbon value are given by the dual value of the constraint. The five-year time line also makes it possible to see the effect of intermediate targets. All the calculated estimates of carbon values are shown in Table 8.

The carbon values derived here cover a large range and their underlying hypotheses illustrate the complexity of the debate on ambitious commitments at national levels: there is a feasible path toward low carbon values, but since real energy systems and policy options are constrained, there is a genuine risk of endorsing

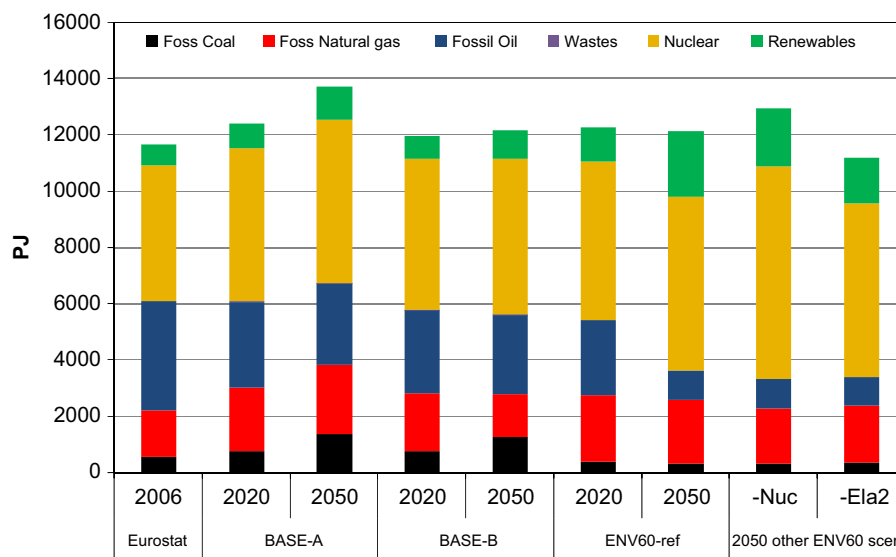


Fig. 5. Total primary energy supply for France.

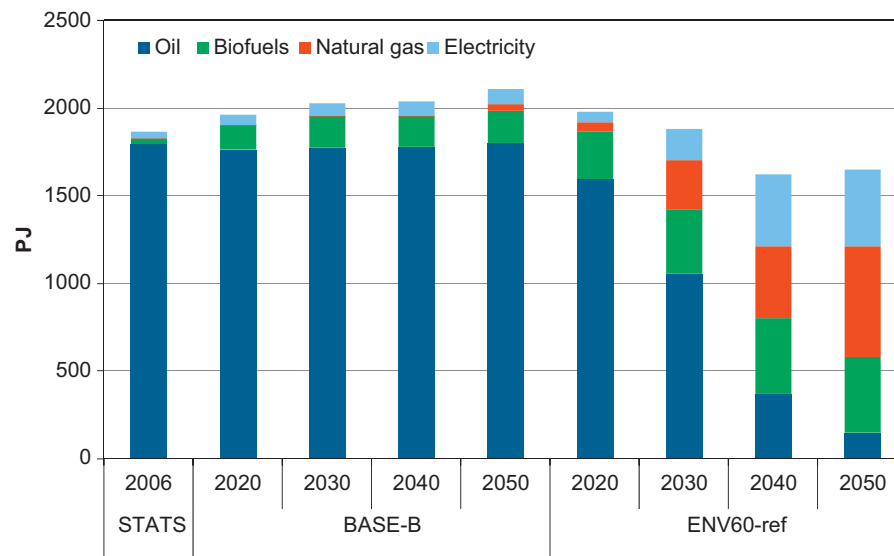


Fig. 6. Final energy consumption in the transport sector.

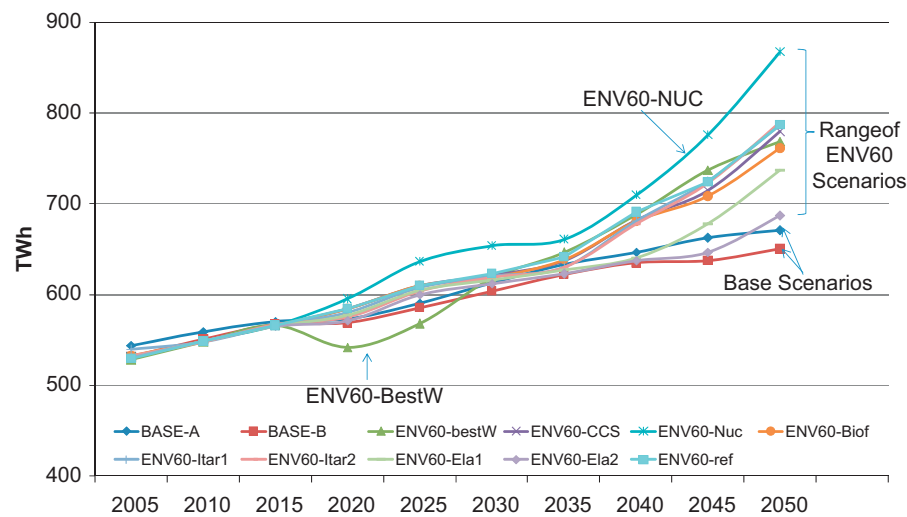


Fig. 7. Total electricity production.

Table 7

Market shares of electricity production in 2020 and 2050.

	BASE-A (%)	BASE-B (%)	ENV60-bestW (%)	ENV60-CCS (%)	ENV60-Nuc (%)	ENV60-Biof (%)	ENV60-ltar1 (%)	ENV60-ltar2 (%)	ENV60-Ela1 (%)	ENV60-Ela2 (%)	ENV60-ref (%)
2020											
Fossil fuels	5	5	5	2	1	1	2	4	2	2	2
of which Non-CCS	100	100	93	62	86	87	95	97	94	96	85
CCS	0	0	7	38	14	13	5	3	6	4	15
Nuclear	80	80	80	79	79	79	79	80	80	80	79
Renewables	15	15	16	19	19	20	19	16	19	17	20
of which Hydro	77	77	77	65	64	63	67	75	65	67	64
Wind	19	19	19	25	25	24	26	22	26	28	24
Biomass	0	0	0	11	11	13	6	0	9	4	12
2050											
Fossil fuels	11	10	2	9	3	7	7	7	3	3	7
of which Non-CCS	100	100	50	13	40	17	17	17	43	38	17
CCS	0	0	50	87	60	83	83	83	57	62	83
Nuclear	76	77	84	66	74	67	65	65	69	75	65
Renewables	13	13	14	25	23	25	28	28	28	22	28
of which Hydro	78	78	66	37	37	38	33	33	36	48	33
Wind	19	19	19	18	18	19	27	27	17	23	27
Biomass	0	0	14	45	45	44	40	40	47	29	40

commitments that will lead to high value. Only estimates for the ENV60-bestW scenario are close to the proposed guideline value (Quinet, 2009) for 2030 and 2050, while calculated values for ENV60-ref are several times higher: 14 times higher in 2020 and more than 4 times higher in 2050.

A central carbon value for our work is defined with the mean value of all scenarios, which peaks around 2020, then reaches a local minimum around 2035, and finally increases strongly again at the end when more efforts are required. The standard deviation is then used to define upper and lower boundaries. This approach is preferred to boundaries given by the minimum and maximum values for all scenarios, which would give more importance to the more optimistic and pessimistic estimates.

The dynamic of the carbon value and its variability are plotted in Fig. 8 along with values from published works. Our calculated central carbon value curve remains in the upper range of world-wide estimates (Kuik et al., 2009; IEA, 2008). The guideline value for France is in the lower range of all estimates and is significantly lower than our estimates.

4.3.1. Effect of relaxing limitations to the energy system: technology, trade or the 2020 constraint

What are the effects of the different critical issues assessed concerning the ENV60-ref scenario? The biofuel option introduces more flexibility for CO₂ reduction in the transport sector. The effect in ENV60-Biof is to lower the 2025 peak by 25% and the 2050 peak by 30%. Allowing more CCS adds an option for

electricity production with low CO₂ content. In ENV60-CCS, this results in an almost 50% reduction of carbon value by 2050, but only 4% decrease in 2020 because of the short-term technical inertia of the electricity supply. Finally, a relaxation of nuclear capacity constraints decreases the carbon value at the end of the horizon by 55% and by 13% in 2020. Among increased technology and trade options, actions in the transport sector thus appear to have the strongest effect on carbon value reduction for the year 2020, while the electricity sector could account for more reductions by 2050.

These scenarios show that a 20% CO₂ reduction in 2020 is technically feasible but very tight and leads to a swift increase of the value of carbon. The intermediate target is important and can generate dual values as high as 400 €/t CO₂. The 2 scenarios that consider a smoother path show that it has a strong effect even without relaxing any technical limitations. When the 2020 target is lowered to 15% (ENV60-Itar1), the carbon value in 2020 drops by 63%. If the new target is a 10% reduction of emissions, the drop is significantly higher and reaches 90%. The first peak in carbon value then occurs in 2030. In both cases, the values at the end of the horizon basically remain roughly unchanged as the long-term target is fixed.

4.3.2. Effect of increased demand responsiveness

Energy is not consumed for itself but to supply useful levels of energy services. Elastic adjustment of these demands alone leads to a very significant reduction in the dual value of the carbon

Table 8

Evolution of carbon value estimates over time.

²⁰⁰⁵ €/tCO ₂	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
ENV60-bestW	0	0	32	93	134	118	120	147	196
ENV60-CCS	0	26	427	299	256	164	287	332	427
ENV60-Nuc	0	23	385	278	229	187	303	334	376
ENV60-Biof	0	26	333	287	243	181	284	312	580
ENV60-Itar1	0	0	163	217	288	136	285	345	832
ENV60-Itar2	0	0	43	134	276	129	264	326	800
ENV60-Ela1	0	17	171	161	235	158	212	295	382
ENV60-Ela2	0	17	104	147	177	164	151	219	325
ENV60-ref	0	27	444	390	250	170	299	345	831
Mean value	0	15	233	223	232	156	245	295	528
Standard deviation	0	11	155	92	46	22	64	64	228

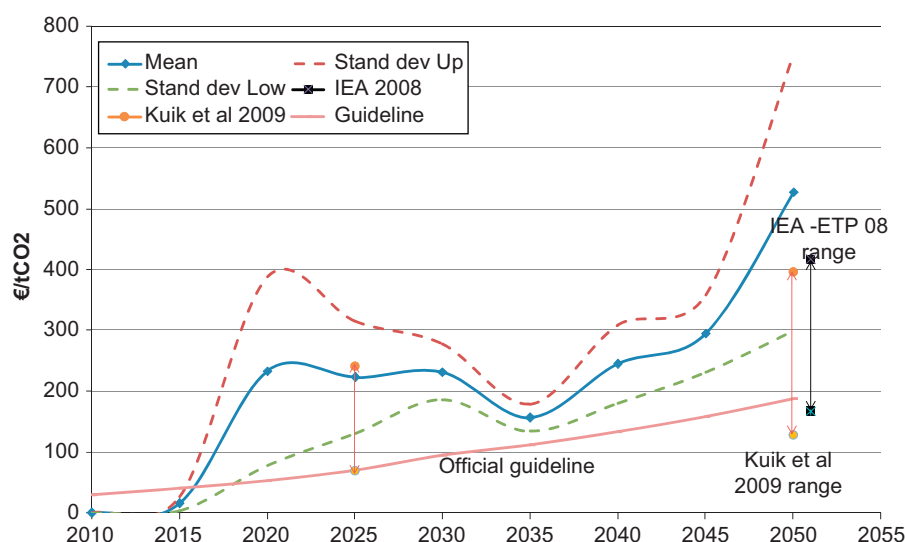


Fig. 8. Statistical synthesis and carbon value from published work.

constraint compared to ENV60-ref: between 62% and 77% in 2020 and from 54% to 60% in 2050. Fig. 9 illustrates the related changes in energy services for sector aggregates. While demand still grows overall, the rate is significantly lower and varies, for instance, from 1% to 0.85% annually for freight transport, and from 0.56% to 0.24% for energy intensive industries. The range of elastic demand responses observed are between 15% and 20% for industry, around 8–10% for the residential and commercial sectors and between 2% and 7% for mobility. The real challenge here is to make these reduced growth rates socially and economically desirable.

4.3.3. Domestic abatement, partial regional markets and international flexibility mechanisms

Our estimates relate to the energy system as a whole. They can be discussed with regards to carbon values expressed by tradable permits markets and the difference can be interpreted as a hidden or shadow carbon value that needs to be implemented through other support mechanisms. Total “where, what and when” flexibility through a perfectly competitive market is not ready to be implemented. The EU emission trading scheme is a partial market where several exemptions and operational issues still exist. In practice, only few such partial markets and few regions are likely to be effectively competitive and functional before 2025. Will they yield carbon values as high as the levels discussed and calculated here? Probably not! Even a secured 10% yearly increase will only bring a value of 20 €/tCO₂ at any given year to 134 €/tCO₂ after 20 years. Thus, while institutional markets are useful experimental demonstrations of the concept of carbon value, a level compatible with a strong abatement target will mainly be implemented through hidden supports. Only the most favorable scenario ENV60-bestW is low enough to be interpreted as a possible evolution of existing markets.

This analysis of domestic mitigation options for France can also serve as a basis for discussing the cost of still theoretical

international flexibility mechanisms that assume total “when and where” flexibility. If such mechanisms were to deliver CO₂ emission permits at price levels expressed by world scale approaches, France would be a net importer in 2020 and 2050. The dynamics of carbon values for intermediate years have received little attention from world-scale studies, but between those two milestones and especially around 2035, France could become an exporter. However, increased accounting of country-level constraints and less-than-ideal options are also likely to push the world carbon value upwards.

5. Conclusion

Once emitted into the atmosphere, CO₂ will remain there for more than a century. Estimating its value over successive time periods is an essential indicator for efficiently defining policy. Our analysis focuses on the variability of carbon value and its implication at country scale. Using a cost effective approach we defend two main conclusions. The first is the importance of increased national knowledge of carbon valuation issues in order to better understand local conditions. The second is the fact that the time dependency of the carbon value is not a simple upward curve and relies on the timing and strictness of mitigation objectives.

Energy systems are constrained and several critical issues for France are analyzed. Different technical responses for meeting French climate objectives are evaluated. The carbon value is a good indicator for comparing their relative tightness. An optimization framework is used. Our estimates are in the upper range of world level values in 2020 and 2050 and only the more optimistic scenario is consistent with the official guideline value.

The best technical options from our reference situation to reduce the carbon value are: biofuel imports for the short term and nuclear power or CCS in the longer run. Reducing the intermediate target in 2020 results in the best response to all options for 2020 while only a steeper drop in the demand for energy services leads to a very strong reduction in both the short and the long term.

Faced with a choice between promising low values and risking very high ones, the proposed approach is a way to assess the choices at stake and inform national decision-making parties. The analysis of French domestic mitigation options can also be extended to illustrate the strategic interest of international flexibility mechanisms. However, increased accounting of country-level constraints and similar less-than-ideal options is also likely to push the world carbon value upwards.

References

- Abadie, L.M., Chamorro, J.M., 2008. European CO₂ prices and carbon capture investments. *Energy Economics* 30, 2992–3015.
- Alberola, E., Chevallier, J., Cheze, B., 2008. Price drivers and structural breaks in European carbon prices 2005–2007. *Energy Policy* 36 (2), 787–797.
- Benz, E., Trück, S., 2009. Modeling the price dynamics of CO₂ emission allowances. *Energy Economics* 31 (1), 4–15.
- Berger, C., Dubois, R., Haurie, A., Lessard, E., Loulou, R., Waaub, J-P., 1992. Canadian MARKAL: an advanced linear programming system for energy and environmental modelling. *Information System and Operational Research Journal* 30 (3), 222–239.
- Bernstein, M.A., Griffin, J., 2006. Regional Differences in the Price-Elasticity of Demand for Energy, RAND Corporation, NREL/SR-620-39512, <<http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39512.pdf>>.
- Blesl, M., Das, A., Fahl, U., Remme, U., 2007. Role of energy efficiency standards in reducing CO₂ emissions in Germany: an assessment with TIMES. *Energy Policy* 35 (2), 772–785.
- Boiteux, M., 2001. Transport: choix des investissements et coût des nuisances. Commissariat général du plan, La documentation Française.

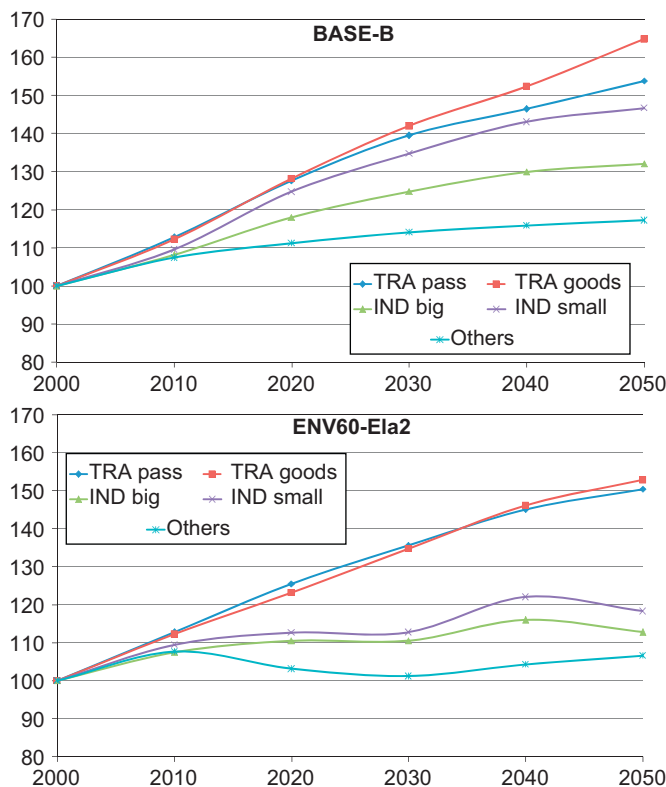


Fig. 9. Evolution of energy service demands compared to 2000.

- Böhringer, C., Hoffmann, T., 2006. The efficiency costs of separating carbon markets under the EU emissions trading scheme: a quantitative assessment for Germany. *Energy Economics* 28 (1), 44–61.
- Clarkson, R., Deyes, K., 2002. Estimating the Social Cost of Carbon Emissions. Government Economic Service Working Paper. HM Treasury, London.
- Convery, F., Ellerman, D., De Perthuis, C., 2008. Le marché européen du Carbone en action : Enseignements de la première phase, Rapport intermédiaire du programme de recherche The European Carbon Market in Action: Lessons from the first Trading Period, <http://mit.edu/globalchange/www/ECM_InterimRpt_March08_Fr.pdf>.
- DGEMP, 2004. Scénario énergétique tendanciel à 2030 pour la France DGEMP-OE 2004, Rapport de la Direction Général de l'Energie et des Matières Premières, June 2004.
- DGEMP, 2008. Scénario énergétique de référence DGEMP-OE 2008. Rapport de la Direction Général de l'Energie et des Matières Premières, April 2008.
- Espey, J., Espey, M., 2004. Turning on the lights: a meta-analysis of residential electricity demand elasticities. *Journal of Agricultural and Applied Economics* 36 (1), 65–81.
- Fishbone, L.G., Abilock, H., 1981. MARKAL, a linear programming model for energy systems analysis: technical description of the BNL version. *International journal of Energy research* 5, 353–375.
- IEA, 2008. Energy Technology Perspectives 2008: Scenarios and Strategies to 2050. OECD/IEA, International Energy Agency.
- IEA, 2010. Projected Costs of Generating Electricity 2010 Edition. International Energy Agency /OECD Nuclear Energy Agency.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: Mitigation. In: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer, L.A. (Eds.), . Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 235–240.
- Kuik, O., Buchner, B., Catenacci, M., Gorla, A., Karayaka, E., Tol, R.S.J., 2008. Methodological aspects of recent climate change damage cost studies. *The Integrated Assessment Journal* 8, 19–40.
- Kaplan, S., 2008. Power plants: characteristics and costs, CRS report for Congress. Congressional Research Service.
- Kuik, O., Brander, L., Tol, R.S.J., 2009. Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions: a meta-analysis. *Energy Policy* 37, 1395–1403.
- Labriet, M., Loulou, R., Kanudia, A., 2004. Global energy and CO₂ emission scenarios—analysis with a 15 region world MARKAL model. In: Haurie, A., Viguier, L. (Eds.), *The Coupling of Climate and Economic Dynamics*. Kluwer Academic, Boston, Dordrecht, London, pp. 205–335.
- Labriet, M., Loulou, R., 2008. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model Part I: model structure. *Computational Management Science* 5, 41–66.
- Lebegue, D., Hirtzman, P., Baumstark, L., 2005. Le prix du temps et la décision publique. Rapport du Commissariat général du plan, La documentation Française.
- Loulou, R., Kanudia, A., Lavigne, D., 1996. GHG abatement in central Canada with interprovincial cooperation. *Energy Studies Review* 8 (2), 120–129.
- Oberndorfer, U., 2009. EU emission allowances and the stock market: evidence from the electricity industry. *Ecological Economics* 68 (4), 1116–1126.
- OECD, 2005. Projected Costs of Generating Electricity 2005 update. OECD/Nuclear Energy Agency/International Energy Agency.
- Pearce, D., 2003. The social cost of carbon and its policy implications. *Oxford Review of Economic Policy* 19 (3), 362–384.
- Puech, J., 2009. Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois, rapport pour le président de la république. Avril 2009.
- Quinet, A., 2009. La valeur tutélaire du carbone, Rapport du Centre d'Analyse Stratégique. La documentation Française.
- Robert-Bobée, I., 2006. Projection de population pour la France métropolitaine à l'horizon 2050, INSEE Premier, 1089, Juillet 2006.
- RTE, 2009. Bilan prévisionnel de l'équilibre offre demande d'électricité en France édition 09. Rapport du Gestionnaire de Réseau de Transport d'Electricité.
- Seifert, J., Uhrig-Homburg, M., Wagner, M., 2008. Dynamic behavior of CO₂ spot prices. *Journal of Environmental Economics and Management* 56, 180–194.
- Simões, S., Cleto, J., Fortes, P., Seixas, J., Huppes, G., 2008. Cost of energy and environmental policy in Portuguese CO₂ abatement—scenario analysis to 2020. *Energy Policy* 36, 3598–3611.
- Syrota, J., 2008. *Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020–2050*. Rapport du Centre d'Analyse Stratégique. La documentation Française.
- Tol, R.S.J., 2005. The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties. *Energy Policy* 33 (16), 2064–2074.
- Tol, R.S.J., 2007. The social Cost of Carbon: Trends Outliers and Catastrophe. Working Paper FNU-144.

Enjeux d'une prospective long terme basée sur un paradigme optimal

Telle que nous la proposons, l'adoption d'une modélisation bottom-up, pour un champ prospectif (et non pas prédictif) repose :

- sur une allocation de ressources via un programme linéaire classique adapté au canevas de la représentation des échanges de flux d'énergie ;
- l'hypothèse d'un arbitrage décisionnel relevant d'une position centrale (éludant donc les questions de marché, de compétitivité, de facteur « humain ») ;
- des critères de choix reposant sur un compromis coût/efficacité ;
- une dynamique temporelle lente représentative d'un horizon long terme (plusieurs décennies) : elle s'appuie sur des agrégations (saisonniers, annuelle, courbe de charge), de spatialité (représentation pauvre voire inexistante de la localisation pour les échanges de flux).

Depuis sa création, la méthodologie de base s'est adaptée aux nouvelles problématiques du secteur de l'énergie (échanges transfrontaliers, analyse du cycle de vie, évaluation de la demande) et aujourd'hui l'acronyme MarkAl recouvre en fait une famille de modèles dédiés à chaque questionnement (MATTER, TIMES, RMARKAL, MARKAL-MACRO, ...).

Malgré ces spécialisations, on conçoit qu'une telle approche n'aura jamais qu'une vertu d'éclairage partiel des conséquences de mesures et de politiques, conscient comme l'écrit L. Gilotte [29] que : *D'une manière ou d'une autre, c'est d'un aller-retour entre les modèles analytiques plus compacts et les exercices numérisés que les débats continueront à se nourrir.*

Il est cependant primordial de toujours rechercher plus de pertinence afin

- de mieux comprendre et interpréter les résultats : avec un souci de plausibilité technique (e.g. fiabilité du système électrique)
- d'améliorer la modélisation intrinsèque : des objets (e.g. réseaux centralisés/décentralisés), des nouveaux concepts (e.g. smart grid, green economy), du comportement (e.g. des ménages), ...

Ces améliorations sont au coeur de notre approche scientifique et nous reviendrons ici sur certaines réalisations menées dans le cadre de deux thèses : le premier travail [10] se situe dans le prolongement de nos questionnements sur la valeur carbone, tandis que le second [22] propose des avancées spécifiques sur les questions liées au secteur électrique.

Ménages et contrainte carbone L'impact environnemental lié aux émissions de gaz à effet de serre constitue un enjeu considérable. La politique de réduction des émissions peut être envisagée conjointement via : des outils économiques de taxation (un « pricing » du carbone) sur le court terme [7], [60] et sur le long terme [2], [61] comme nous l'avons vu précédemment. Elle peut également compter sur des progrès voir des ruptures technologiques. Enfin, comme la contribution sectorielle majeure au niveau mondial au bilan émissif provient de la production d'électricité, suivie par les transports, une forte contrainte de réduction des émissions de CO_2 ne pourra se faire sans des modifications comportementales profondes.

C'est pourquoi il nous a paru pertinent de se concentrer sur un point de vue particulier : celui des ménages, afin d'explorer (au sens prospectif) le comportement des ménages, dans une vision long terme, face à la contrainte carbone (quelle que soit sa déclinaison).

Dans le cadre de sa thèse, J.M. Cayla a développé un modèle TIMES portant sur les secteurs résidentiel et transports, en s'appuyant notamment sur une représentation des ménages très désagrégée qui permet d'apporter beaucoup plus de robustesse par rapport aux autres modèles de ce type, basés sur la description d'un ménage moyen. De plus, à l'aide d'une enquête auprès de 2000 ménages réalisée dans le cadre de ce travail, il a été possible de prendre en compte le comportement de consommation des ménages de manière relativement fine, notamment en rendant compte des contraintes subies par les ménages et des arbitrages qu'ils réalisent entre coût et confort [12] (en annexe de ce document).

L'exercice de prospective réalisé à partir de ce modèle permet d'évaluer l'efficacité en terme de réduction et l'impact sur le budget des ménages de différents outils politiques. Il permet notamment de visualiser que l'instauration d'une taxe carbone est un moyen efficace de réduire les émissions et que la mise en place conjointe de subventions ciblées permet de compléter l'action de cette taxe tout en diminuant son impact distorsif sur le budget des ménages. [11].

Enjeux pour le système électrique Parmi les grandes questions liées à l'énergie, celle du déploiement du vecteur électrique prend une place prépondérante : car les usages de l'électricité sont loin d'être neutres en terme d'impacts environnementaux et génèrent des pertes considérables. Le problème peut alors se résumer en une interrogation simple : *Le recours à l'énergie électrique est-il raisonnable dans une perspective de développement durable ?*

Afin d'envisager cette question, et d'apprécier le secteur électrique sur le long terme au regard de ses émissions propres en particulier, il est nécessaire d'intégrer les dimensions spatiales (multi-échelles) et temporelles (court, moyen et très long terme) qui font la complexité du secteur électrique projeté dans une démarche prospective.

Il s'agit donc d'aller au-delà des méthodologies classiques (MarkAl compris) qui rendent possibles des transferts de pollution en ajustant a posteriori les capacités de transport (ou le déploiement du réseau) aux scénarios :

1. de demande, éventuellement révisés par des actions de Maitrise de la Demande d'Electricité (MDE) ;
2. de production, gouvernés par l'optimisation des coûts d'exploitation sous contrainte de disponibilité.

En particulier un enjeu lié aux questions de réseau et souvent occulté a priori dans l'exercice prospectif est la question de la fiabilité de la fourniture. Cette fiabilité constitue une caractéristique essentielle des systèmes électriques : elle évalue leur capacité à se prémunir d'incidents d'exploitation, et repose sur leurs réserves dynamiques caractérisées par le plan de tension et la fréquence, dont les temps caractéristiques varient entre quelques millisecondes et quelques heures. Or, les exercices de prospective long terme, s'intéressant à l'évolution des systèmes énergétiques sur plusieurs décennies, ne permettent pas d'apprécier la fiabilité de fourniture. Les systèmes électriques proposés sur l'horizon prospectif risquent alors de

ne plus la garantir, et ceci d'autant plus que l'intégration massive d'énergies renouvelables pourrait se faire au détriment de la fiabilité, du fait de la complexité induite par la gestion de l'intermittence.

L'enjeu de nos travaux consistait à rendre compatible l'évaluation de la fiabilité avec la dynamique temporelle associée aux exercices prospectifs de long terme.

Pour cela, il fallait s'appuyer sur une approche qui permette une représentation agrégée des systèmes électriques : l'approche thermodynamique, déjà utilisée avec succès dans une formulation variationnelle de l'électromagnétisme [51], [50] a constitué un cadre particulièrement favorable [52] pour réconcilier les phénomènes dynamiques de court terme et de long terme ⁸.

Revenons quelques instants sur les raisons pour lesquelles le cadre thermodynamique constitue un cadre naturel d'expression de la compétition entre vecteurs d'énergie particulièrement bien adapté à la description des flux d'énergie sur le réseau électrique (on retrouvera si utile l'ensemble de ces développements dans [53] en annexe de ce document.) Pour décrire un système complexe dont le nombre de particules en interactions est de l'ordre du nombre d'Avogadro, on doit adopter une description statistique. Dans ce formalisme, l'état d'équilibre, i.e. thermodynamique, d'un système satisfait au maximum de l'entropie de Shannon [65] respectant la connaissance macroscopique [32]. Cependant, pour être complète une approche thermodynamique doit également permettre de décrire l'évolution du système sous des variations de ses variables d'état. Afin de rester cohérent avec le postulat d'entropie maximale caractérisant les états d'équilibre, l'entropie du système isolé global ne peut que croître au cours du temps et idéalement rester constante dans le cas d'une évolution réversible. Invariant par renversement du temps, l'effet Joule est la manifestation de l'irréversibilité dans le contexte particulier de l'électromagnétisme. On montre alors que la loi de Faraday correspond à l'écriture locale d'une condition globale exprimant une tendance optimale vers la réversibilité [51], [50]. Cette propriété remarquable prolonge, par sa signification thermodynamique, les approches variationnelles plus classiques de l'électromagnétisme [30], [58]. Dans cette écriture, la loi de Lenz s'exprime par l'inertie du couplage entre le champ électromagnétique et ses sources d'excitation. Elle introduit naturellement le rôle essentiel de la puissance réactive pour assurer la stabilité du réseau sous des fluctuations de charges ou de production. Compte tenu de la segmentation des échelles spatiales mises en jeu par les phénomènes de conversion électromagnétique, on peut formuler une hypothèse de "champ moyen" où un lieu de conversion subit essentiellement le comportement collectif (moyenné) de son voisinage. Alors le caractère quadratique de la fonctionnelle sur laquelle est exprimée la condition de réversibilité procure un formalisme multi-échelles qui consiste à substituer la condition globale de réversibilité par une déclinaison sur chaque échelle contribuant à la conversion électromagnétique. Le réseau électrique réalisant l'échelle la plus macroscopique, son comportement dynamique obéit à l'évolution la plus réversible. Or, si cette condition est assurée globalement par l'équilibrage du réseau, on peut chercher à la satisfaire le plus localement possible, l'écart définissant une (densité de) puissance électrique imputable au mode de distribution choisi et la disponibilité escomptée.

Cette représentation dynamique et continue est extrêmement précieuse car elle nous permet de nous affranchir de la description par réseau de Kirchhoff inutilement lourde, voire inex-

8. D'un point de vue théorique, l'uniformité du temps confère à l'énergie d'un système isolé d'être un invariant, et par conséquent, d'être susceptible de réconcilier les échelles de temps

exploitable, dans le cadre de l'exercice prospectif. Ainsi, grâce à cette vision agrégée du réseau électrique il est possible d'établir deux indicateurs de fiabilité relatifs aux réserves dynamiques du système électrique, et donc de quantifier de façon originale le niveau de fiabilité d'un système électrique en fonction du mix de production qui lui est associé [22]. Ce résultat a fait l'objet du dépôt d'un brevet de principe [46], dont on trouvera les éléments diffusables en annexe de ce document.

Dés lors, on dispose d'un outil quantitatif qui nous permet de valider les scénarios prospectifs électriques en terme de fiabilité et de réfléchir au mix qui permettrait de ne pas dégrader ce critère tout en

- intégrant massivement des énergies de type renouvelable, majoritairement réputées pour ne pas participer à cette réserve [43]
- introduisant des éléments de gestion de la demande qui sous tendent le principe du réseau intelligent [8]

Chapitre 5

Perspectives

Et après ?

Comme nous l'avons évoqué, les questions d'énergie associées aux changements climatiques et à la mondialisation sont l'occasion d'un renouvellement thématique dont nous avons pu suivre les évolutions durant la dernière décade. Nous avons rappelé la charnière constituée par l'année 2000 en envisageant les conséquences complexes de l'ouverture des marchés de l'électricité, puis du gaz en Europe.

A partir de cette date, les contraintes environnementales sur les émissions de gaz à effet de serre liées à l'activité anthropique, et en particulier celles associées à la chaîne énergétique (de l'amont à l'aval) ont été l'objet de toutes les attentions et ont suscité la publicité d'un certain nombre de solutions, toutes promues dans l'espoir de conduire à des réductions significatives du volume des émissions globales.

Ainsi nous avons pu assister

- à l'émergence ou à la renaissance de concepts tels que : écologie industrielle, efficacité énergétique, économie verte, croissance verte, décroissance, finance carbone ... certains étant intégrés dans les objectifs de l'agenda climatique (comme les gains en efficacité énergétique)
- à la promotion de ressources renouvelables nouvelles ou ancestrales : biocarburants de première et de deuxième génération, biomasse, solaire, éolien, énergie des mers (vagues, pelamis, hydroliennes, ...) géothermie, ...
- aux déploiements ou à la promotion des investissements dans des technologies (ou solutions technologiques) : panneaux solaires photovoltaïques, batteries, smart grid (réseau intelligents), smart cities (villes durables), smart buildings (bâtiments intelligents), ...

Tous sont érigés au rang de solution pour la lutte contre les changements climatiques, tous sont prétextes à discordes entre les pour et les contre.

Pour nous il s'agit en réalité d'autant de sujets d'investigation pour lesquels la démarche prospective assortie de son paradigme optimal, et telles que décrites précédemment, peuvent se décliner de manière à apporter des éléments d'appréciation et d'arbitrage quant à l'efficacité des solutions proposées, et à leur robustesse.

Dans ce contexte, la mise en oeuvre de cette philosophie, destinée à accompagner le décideur pour décrypter le futur sur un certain nombre de questions ouvertes nous a permis certaines réalisations [66], [54], [64], [9], [23], [] et constitue le cadre de travaux de thèse :

- Une roadmap pour la smart grid ? ou quels bénéfices (climatique) attendre des solutions dites de Demand Response (ou effacement de la demande) : thèse de S. Bouckaert (initiée en 2010).
- Synergies eau et énergie ou comment intégrer l'eau dans une prospective énergétique de long terme : thèse de A. Dubreuil (initiée en 2009).
- Futur des biofuels ou les bénéfices des nouveaux procédés technologiques : thèse de P. Hugues (initiée en 2011).
- Décroissance ou croissance verte ? quels concepts sous jacents, quel impact sur le long terme ? : thèse de F. Briens (initiée en 2011).
- Intégration du renouvelable sur un réseau centralisé/décentralisé ? Quel arbitrage spatial pour une intégration massive respectueuse de la qualité du service ? : thèse de V. Krakowski (sera initiée en 2012)

Finalement, parce qu'ils s'appliquent autant à nos recherches qu'à leur esprit, et sans doute au delà à nous même, nous concluons sur les conseils prospectifs de C. Peguy :

L'heure qui sonne est sonnée. Le jour qui passe est passé. Demain seul reste, et les après-demain

Bibliographie

- [1] M. Armatte and A. Dahan. Modèles et modélisations (1950-2000) : nouvelles pratiques, nouveaux enjeux. *Revue d'Histoire des Sciences*, 57(2) :243 – 303, 2004.
- [2] E. Assoumou and N. Maïzi. Carbon value dynamics for france : A key driver to support mitigation pledges at country scale. *Energy Policy*, 39(7) :4325–4336, 2011.
- [3] G. Berger, J. de Bourbon-Busset, and P. Massé. *Textes fondamentaux de la prospective française 1955-1966*. L'Harmattan, 2007.
- [4] D. P. Bertsekas. *Dynamic programming and optimal control*. Athena Scientific, 1995.
- [5] J.F. Bonnans, J. Ch. Gilbert, C. Lemaréchal, and C. Sagastizàbal. *Optimisation Numérique : aspects théoriques et pratiques*, volume 27 of *Mathématiques et Applications*. Springer-Verlag, Paris, 1997.
- [6] M. Bordier and N. Maïzi. An issue around the active control of sound. In *Proceedings European Control Conference, Roma*, September 1995.
- [7] M. Bossy, N. Maïzi, O. Pourtallier, L. Violeau, and E. Assoumou. Carbon pricing in the european carbon market context ; an indifference pricing approach. Rapport de Recherches ADEME. N0805 C 0098., 2011.
- [8] S. Bouckaert, E. Assoumou, and N. Maïzi. Smart grids and prospective modeling for the electricity sector. In *25th European Conference on Operational Research, EURO XXV*, Vilnius, July 2012.
- [9] S. Bouckaert, S. Selosse, A. Dubreuil, E. Assoumou, and N. Maïzi. Towards a shared optimum for water and energy resources : A focus on the middle east using the tiam-fr model. In *International Energy Workshop*, July 2011.
- [10] J.-M. Cayla. *Les ménages sous la contrainte carbone*. PhD thesis, MINES ParisTech, March 2011.
- [11] J.-M. Cayla and N. Maïzi. Which households will have to pay to reduce co_2 emissions ? : Integrating behavior and heterogeneity into the times-households model. *Energy Policy*, in revision.
- [12] J.-M. Cayla, C. Marchand, and N. Maïzi. The role of income in energy consumption behaviour : Evidence from french households data. *Energy Policy*, 39(12) :7874–7883, 2011.
- [13] G. Cohen. Optimisation des grands systèmes. Cours DEA Modélisation et Méthodes Mathématiques en Economie. Paris I, 2004.
- [14] B. Colasse, F. Pavé, and C. Riveline. Une pédagogie médiévale pour enseigner la gestion. *Annales des Mines – Gérer et Comprendre*, 38 :14–32., 1995.

- [15] M. Dagdelen. *Restitution des stimuli inertiels en simulation de conduite*. PhD thesis, MINES ParisTech, 2005.
- [16] M. Dagdelen, G. Reymond, A. Kemeny, M. Bordier, and N. Maïzi. Mpc based motion cueing algorithm : Development and application to the ultimate driving simulator. In *Proceedings of the DSC Europe Conference*, pages 221–233, September 2004.
- [17] M. Dagdelen, G. Reymond, A. Kemeny, M. Bordier, and N. Maïzi. Model-based predictive motion cueing strategy for vehicle driving simulators. *Control Engineering Practice*, 17(9) :995–1003, 2009.
- [18] A. Dahan. *Growing Explanations. Historical Perspectives in Recent Sciences*, chapter Chaos, Disorder and Mixing : A new Fin-de-Siècle Image of Science ?, pages 67–94. Duke University Press, 2004.
- [19] A. Dahan and D. Aubin. *Chaos et Systèmes dynamiques : Convergences et recompositions, un aperçu historique*, chapter Éléments pour une épistémologie, pages 342–347. Hermann, 2007.
- [20] G. B. Dantzig. *Linear programming and extensions*. Princeton University Press, 1963.
- [21] G.B. Dantzig and P. Wolfe. The decomposition algorithm for linear program. *Econometrica*, 29 :767–778, 1961.
- [22] M. Drouineau. *Modélisation prospective et analyse spatio-temporelle : intégration de la dynamique du réseau électrique*. PhD thesis, MINES ParisTech, December 2011.
- [23] A. Dubreuil, E. Assoumou, S. Bouckaert, S. Selosse, and N. Maïzi. Water modeling in an energy optimization framework - the water-scarce middle east context. *Applied Energy*, to appear.
- [24] H. Elloumi. *Commande des plateformes avancées de simulation de conduite*. PhD thesis, MINES ParisTech, October 2006.
- [25] H. Elloumi, M. Bordier, and N. Maïzi. An encompassing formalization of robust computed torque schemes of robot systems. In *Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, Sevilla, December 2005.
- [26] H. Elloumi, M. Bordier, and N. Maïzi. Integrated model-based control with human perception models in driving simulation. In *Proceedings of IMACS International conference on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation*, Paris, July 2005.
- [27] H. Elloumi, M. Bordier, and N. Maïzi. An optimal control scheme for a driving simulator. In *Proceedings of ICINCO International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Barcelona, September 2005.
- [28] L.G. Fishbone and H. Abilock. Markal, a linear programming model for energy systems analysis : technical description of the bnl version. *International journal of Energy research*, 5 :353–375, 1981.
- [29] L. Gilotte. *Incertitude, inertie et choix optimal : modèles de contrôle optimal appliqués au choix de politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre*. PhD thesis, Ecole des Ponts ParisTech, 2004.
- [30] P. Hammond. *Energy methods in electromagnetism*. Oxford University Press, 1981.
- [31] <http://cowles.econ.yale.edu/>. Cowles foundation.
- [32] E. T. Jaynes. Information theory and statistical mechanics. *The Physical Review*, 106(4) :620–630, May, 15 1957.

- [33] N. Karmarkar. A new polynomial time algorithm for linear programming. *Combinatorica*, 4 :373–395, 1984.
- [34] L.G. Khachiyan. A polynomial algorithm in linear programming. *Doklady Akad. Nauk SSSR (trad. anglaise : Soviet Math. Doklady)*, 224 (trad. anglaise 20) :1093–1096 (trad. anglaise 191–194), 1979.
- [35] V. Klee and G.L. Minty. How good is the simplex algorithm? *Inequalities III*, pages 159–175, 1972.
- [36] L.S. Lasdon. *Optimization Theory for Large Systems*. Mac Millan, Toronto, 1970.
- [37] A. Le Mouél, F. Neirac, and N. Maïzi. Application d’une méthode de réduction hankel optimale à la solution de l’équation de la chaleur. *Revue Générale de Thermique Française*, 33(389) :336 – 343, Mai 1994.
- [38] N. Maïzi. Réduction de modèle appliquée à une équation d’évolution de la chaleur. Rapport de Recherche MINES ParisTech - 05/1991, 1991.
- [39] N. Maïzi. *Reduction au sens de la norme de Hankel de modeles dynamiques de dimension infinie*. PhD thesis, MINES Paristech, 1992.
- [40] N. Maïzi. A “relaxation” approach which allows Hankel approximation of some vibrating structures, volume 185 of *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [41] N. Maïzi. l^∞ approximation of a parabolic system regarded as a delay system. *Systems and Control Letters*, 6 :457–467, 1994.
- [42] N. Maïzi and E. Assoumou. Modélisation prospective et spécificités de la politique énergétique française. *J3eA*, 6, 2007.
- [43] N. Maïzi and E. Assoumou. Scénarios prospectifs france à l’horizon 2050. Cahiers de la Chaire. Working Paper N° 2012-02-05., December 2011.
- [44] N. Maïzi and M. Bordier. Optimal operational loads for distributed cogeneration power plants. In *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, volume 7, 2007.
- [45] N. Maïzi, M. Bossy, O. Pourtallier, and R. Carmona. Carbon allowances and electricity prices : a game-theory approach. In *7th International Congress on Industrial and Applied Mathematics*, July 2011.
- [46] N. Maïzi, M. Drouineau, and V. Mazauric. Procédé d’estimation de la stabilité d’un système électrique. Brevet numéro FR 11 61087. 2/12/2011, Décembre 2011.
- [47] N. Maïzi, V. Mazauric, E. Assoumou, and M. Drouineau. Long-term planning and the sustainable power system : A focus on flexibility needs and network reliability. In *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PES ’09. IEEE/PES*, pages 1–6, Seattle, WA, March 2009.
- [48] P. Massé. *Le Plan ou l’anti-hasard*. Hermann, 1991 (réédition).
- [49] P. Matarasso. *Les modèles du futur*, chapter La construction historique des paradigmes de modélisation intégrée : William Nordhaus, Alan Manne et l’apport de la Cowles Commission. La Découverte, Paris, 2007.
- [50] V. Mazauric. *Des principes thermodynamiques aux équations de Maxwell : Une approche variationnelle de l’électromagnétisme*, volume 1, Electromagnétisme et éléments finis, pages 147–262. Hermès, Paris, 2003.

- [51] V. Mazauric. From thermostatics to maxwell's equations : a variational approach of electromagnetism. *IEEE Transactions on Magnetism*, 40 :945–948, 2004.
- [52] V. Mazauric and N. Maïzi. A global approach of electromagnetism dedicated to further long-term planning. In *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, volume 7, 2007.
- [53] V. Mazauric and N. Maïzi. Optimality principles for the sustainability of electrical systems : a thermodynamic approach. In *International Conference on Applied Energy*, 2012.
- [54] V. Mazauric, N. Maïzi, A. Anglade, and G. Guerassimoff. Desperatly seeking for energy efficiency using information and communication technologies? In *IEEE PES Power Systems Conference and Exhibition*, Seattle, WA, USA, 2009., 2009.
- [55] D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, and W.W. Behrens III. *The Limits to Growth : A report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. Universe Books, 1972.
- [56] J. Neering. *Optimisation du positionnement et Localisation de source acoustiques passives*. PhD thesis, MINES ParisTech, April 2009.
- [57] J. Neering, M. Bordier, and N. Maïzi. Optimal passive source localization. In *Proc. International Conference on Sensor Technologies and Applications SENSORCOMM, Valencia*, October 2007.
- [58] B. Nogarede. Machines tournantes : conversion électromécanique de l'énergie. In *Traité de génie électrique*, volume D3410, pages 1–19. Techniques de l'ingénieur, 2000.
- [59] W.D. Nordhaus. Rolling the "dice" : An optimal transition path for controlling greenhouse gases. *Science*, 258, November 1992.
- [60] Davidau O., Bossy M., Maïzi N., and Pourtallier O. Indifference prices for co₂ emission allowances. In *23rd Conference on Operational Research, EURO XXIII*, July 2009.
- [61] A. Quinet. La valeur tutélaire du carbone. Technical report, Rapport du Centre d'Analyse Stratégique. La documentation Française., 2009.
- [62] V. Roy and N. Maïzi. Utilisation des langages réactifs synchrones pour la simulation d'un système multi-énergies. *Revue de l'électricité et de l'électronique*, (10) :59–64, novembre 2000.
- [63] V. Roy and N. Maïzi. Towards an integrated conception of hybrid dynamical systems. In *Proceedings of IFAC Barcelona*, 2002.
- [64] S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi, and V. Mazauric. Post-kyoto policy implications on the energy system : A tiam-fr long-term planning exercise. In *XXIe World Energy Congress*, Montreal, Canada, September 12-16 2010. WEC.
- [65] C.E. Shannon. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27 :379–423, 1948.
- [66] V. Mazauric N. Maïzi, E. Assoumou. Energy efficiency and the "triple 20" european policy : Lessons drawn from the french case. In *31th International Association for Energy Economics International Conference*, Istanbul, Turkey, 2008.
- [67] R. Vanderbei. Linear programming : foundations and extensions. In *International Series in Operation Research and Management Science*, volume 114. Springer, 2008.

- [68] E. Vieille Blanchard. *Les Modèles du Futur*, chapter Croissance ou stabilité ? L'entreprise du Club de Rome et le débat autour des modèles, pages 21– 43. La Découverte, 2007.
- [69] S. Zouaoui-Elloumi. *Reconnaissance de comportements de navires dans une zone portuaire sensible par approches probabiliste et événementielle* :. PhD thesis, MINES ParisTech, 2012.
- [70] S. Zouaoui-Elloumi, J.-P. Marmorat, V. Roy, and N. Maïzi. Modeling ship behavior based on hidden markov models. In *Proceedings of Signal Processing, Pattern Recognition, and Applications (SPPRA 2011)*, February 2011.
- [71] S. Zouaoui-Elloumi, J.-P. Marmorat, V. Roy, and N. Maïzi. Securing harbors by modeling and classifying ships behaviors. In *Proceedings of the 20th Behavior Representation in Modeling and Simulation (BRIMS) Conference, Utah*, March 2011.

Troisième partie

Annexes

Pour compléter les exposés qui précèdent, on trouvera dans ces annexes les articles suivants :

relatif chapitre 2 : contrôle actif du son :

- l'article détaillant les développements relatifs au contrôle actif du son [6]

relatif chapitre 4 : ménages et carbone :

- l'article présentant l'exploitation de l'enquête sur le comportement des ménages en particulier dans le cadre prospectif [12]

relatif chapitre 4 : prospective et vecteur électrique :

- l'article discutant les enjeux de l'intégration du court terme pour une meilleure description des systèmes électriques dans une prospective de long terme [47].
- l'article présentant la déclinaison de l'approche thermodynamique pour représenter le réseau électrique en une vision agrégée [53].
- la première page du Brevet de principe[46].

Article [6] relatif au chapitre 2

contrôle actif du son

AN ISSUE CONCERNING THE ACTIVE CONTROL OF SOUND

M. Bordier, N. Maïzi
Centre de Mathématiques Appliquées
École des Mines de Paris
BP n° 207 - 06904 Sophia Antipolis Cedex
France

Keywords : H_∞ control. Infinite-dimensional system. Hyperbolic system. Rational approximation. L^2 identification.

Abstract

Controller synthesis in the context of active control of an echo clearly suggests the use of recent trends and developments in control. As a matter of fact, it is a paradigm for applications of the last ten last years' developments in frequency multi-variable techniques such as factorization, rational approximation (Hankel), H_∞ control, L^2 identification under constraints.

In this paper we show how this problem can be reduced to a standard H_∞ control problem and we give a few indications for its resolution, using the previous techniques.

1 Introduction

When the source is known, methods of noise reduction are almost exclusively based on the emission, in real-time, of a signal in phase opposition with the acoustic source. These techniques, called *active*, have proven to be adequate for directional noise pollution with a poor ray spectrum. As examples of applications, we can mention the anti-noise helmet developed by the Laboratoire d'Acoustique de Marseille, as well as the anti-noise systems designed for ventilation shafts, or helicopter cockpits, ... These techniques consist in reducing the effect of an acoustic source in a designated small area.

The issue is different when the incident source is unknown.

More precisely, let us consider the case of an undesirable perturbation generated by an echo: the obstacle (for instance a submarine) reflects the incident signal (unknown); the perturbation is added to the signal generated by the primary source (a field of pressure in the case of the submarine). And the existence of this perturbation indicates the presence of the obstacle.

In this case, assumptions on the location, enclosed environment, periodicity of the source are not verified, and the use of an active source in order to reduce the echo remains a basic idea. For if we have sensors (microphones) and actuators (loudspeakers able to generate an output wave), it becomes possible to think about the adaptation of the emission of the loudspeakers to the output signals of the microphones, in order to minimize the acoustic energy of the reflected wave. In other words, we consider the control of an echo in real-time, using measurements of the pressure in a nearby field, in order to make the obstacle transparent to the incident wave.

In this paper, we expose the issue leading to the interpretation of the active control of an echo, when the source is unknown, as a standard H_∞ control problem.

Although rigorous in its treatment, the first section has been written with the minimum analytical sophistication (see [3] for more details) : it intends to describe the dynamics of the obstacle in the context of the active control of sound and to establish the energy criterion.

The interpretation, in terms of transfer function, of this criterion, is the idea leading to the presentation of the active control of an echo as a standard H_∞ problem as shown in section 2.

We shall, in the conclusion, touch upon the first developments toward its resolution using frequency multi-variable techniques for infinite dimensional systems, and those problems remain still unsolved.

2 The asymptotic energy criterion

2.1 Dynamics of the obstacle

In the following, we assume that the acoustic source is located far from the obstacle; this implies that the incident acoustic wave, radiated by the source, is plane and propagating in the direction of a unit vector k . The scattering of this wave by an obstacle Ω with boundary $\partial\Omega$, can be described by the Neumann problem [9] where the

first equation is known as the Helmholtz equation :

$$\begin{cases} \omega^2 v(x) + \Delta v(x) = 0 & \omega \in \mathbb{R}, x \in \Omega^c \subset \mathbb{R}^3 \\ \partial_n v(x) = \partial_n e^{-i\omega kx} & x \in \partial\Omega \end{cases} \quad (1)$$

where $v(x)$ is subject to the Sommerfeld condition :

$$\lim_{|x| \rightarrow \infty} \sqrt{|x|} |\partial_n v(x) + i\omega v(x)| = 0$$

with the notations :

- $x \in \mathbb{R}^3$ is the space variable;
- $v(x)$ is the complex acoustic potential of the scattered wave, and depends on ω ,
- $n(x)$ is the normal to $\partial\Omega$ directed into Ω , and ∂_n the normal derivative,
- $e^{-i\omega kx}$ is the potential of the incident plane wave.

Under the assumptions that obstacle Ω is a star-like finite body, with a smooth boundary $\partial\Omega$, it has been shown [6, 9] that the solution to equation (1), considered as a function of ω , has a meromorphic extension in \mathbb{C} . All its poles are in the complex left half plane.

In this case, the scattering amplitude r , often called the radiation pattern, is given by equation :

$$r(\mathbf{x}, \omega) = \lim_{|x| \rightarrow \infty} \left(\frac{e^{-i\omega|x|}}{|x|} \right)^{-1} v(x) \quad (2)$$

where $\mathbf{x} = x/|x|$. It is the solution of an integral equation [6, 8, 9] and as a function of ω , r has a holomorphic extension in the complex right half plane Π^+ and is meromorphic in \mathbb{C} .

For a scattered potential $v(x)$, the energy flux through a sphere of radius R , which contains the obstacle, does not depend on R ; its expression is given by :

$$\Phi = \omega^2 \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{|x|=R} \|v(x)\|^2 d\gamma$$

Let us consider, now, the incident potential $\phi(\omega)e^{-i\omega kx}$; by linearity, the scattered wave is $\phi(\omega)v(x)$ where $v(x)$ is the solution of (1). Using the asymptotic form (2) for $v(x)$, the outgoing energy through the sphere of radius ∞ of the scattered wave is given by :

$$E_\infty = \int_{-\infty}^{+\infty} \omega^2 \phi(\omega) \left(\int_{\mathbb{S}_2} r(\mathbf{x}, \omega) \overline{r(\mathbf{x}, \omega)} d\gamma \right) \overline{\phi(\omega)} d\omega \quad (3)$$

where \mathbb{S}_2 denoted the unit sphere of \mathbb{R}^3 .

This expression is bounded if the function $\omega\phi(\omega)$ belongs to $L^2(\mathbb{R})$ [3].

Under this condition, the outgoing energy is the $L^2(\mathbb{S}_2 \times \mathbb{R})$ norm of the function $\omega\phi(\omega)r(\mathbf{x}, \omega)$. Moreover, this function is the trace on the imaginary axis of the function $\mu(s) = s\phi(s)r(\mathbf{x}, s)$ of the complex variable s which

is analytic in the complex right half plane Π^+ . Using the estimation of energy (3), it follows that the function $\mu(s)$ belongs to the Hardy space $H_2(\Pi^+; L^2(\mathbb{S}_2))$.

Therefore, the scattering amplitude $r(\mathbf{x}, s)$ is a multiplicative operator from $H_2(\Pi^+)$ to $H_2(\Pi^+; L^2(\mathbb{S}_2))$, and, thus, an element of $H_\infty(\Pi^+; L^2(\mathbb{S}_2))$ [10].

This shows that the obstacle can be interpreted as a linear stable dynamical system whose transfer function is given by the scattering amplitude. This system associates the derivative of the incident potential $s\phi(s)$ (a quantity similar to a pressure) with the asymptotic potential of the scattered wave.

In the following, $s\phi(s)$ will be denoted $w(s)$.

2.2 The actuators

We have made the assumption that the scattered radiation will be minimized by an active control : this is achieved by using actuators, located on the surface of the obstacle. In order to accurately describe the asymptotic energy, their action must be taken into account.

These n actuators are vibrating diaphragms controlled by the input signals, denoted $u_i(s)$, $i = 1 \dots n$, in the frequency domain. Here again, the radiated waves are solutions of the Helmholtz equation and we can associate a radiation pattern to each actuator : it will be denoted $r_i(\mathbf{x}, s)$. The function r_i is the transfer function between the control signal $u_i(s)$ and the potential of the emitted wave in the far field.

2.3 Energy criterion

The perturbation wave in the incident sound field is the superposition of the wave scattered by the obstacle, and the waves radiated by the actuators.

We can express its asymptotic energy as it has been done before : it is the $H^2(\Pi^+; L^2(\mathbb{S}_2))$ norm of the far field potential $\Lambda(\mathbf{x}, s)$ which is :

$$\Lambda(\mathbf{x}, s) = r_0(\mathbf{x}, s)w(s) + \sum_{i=1}^{i=n} r_i(\mathbf{x}, s)u_i(s)$$

where $r_0(\mathbf{x}, s) = r(\mathbf{x}, s)$.

After the development of this expression and its integration on \mathbb{S}_2 we can write the energy as :

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} e^*(\omega) A(\omega) e(\omega) d\omega \quad (4)$$

where $e(\omega) = (w(\omega), u_1(\omega), \dots, u_n(\omega))$ and where $A(\omega) = (a_{ij}(\omega))$ is an $(n+1) \times (n+1)$ hermitian matrix with :

$$a_{ij}(\omega) = \int_{\mathbb{S}_2} \overline{r_i(\mathbf{x}, \omega)} r_j(\mathbf{x}, \omega) d\gamma.$$

3 Open-loop minimization : a factorization problem

The energy criterion gives the “acoustic transparency” of the obstacle. Now, it is possible to determine what signals should be emitted to suppress the effect of the scattered radiation in the incident source field. Such signals are determined by the minimization of the criterion, for a given incident wave, under the constraint that the control signal be physically realizable (that is to say causal).

3.1 The factorization

To achieve the minimization, we will express the criterion, in the frequency domain, as a H_2 -norm of a vector of functions depending on the emitted signals. Indeed, under classical assumptions and according to [10], a factorization of the matrix $A(\omega)$ as $A(\omega) = h(\omega)h^*(\omega)$ exists where the right half complex plane analytic extension $h(s)$ of $h(\omega)$ is an outer function which belongs to H_∞ . Practically, the difficulty for this step comes from the fact that the energy criterion (4) is non rational and only an approximation of h can be given using, for example, the multi-variable least squares inverse algorithms developed in [4, 11] and their references.

The energy criterion is then written as the H_2 -norm of $h(s)e(s)$:

$$E = \|h(\omega)e(\omega)\|^2$$

and the open-loop minimization can be easily performed.

3.2 Dynamics of the interactions

The main idea here is to interpret the outer factor $h(s)$ involved in the energy criterion as the transfer function of a causal, stable, dynamical system. This system is submitted to the input signal constituted by both the incident wave $w(\omega)$ and the emitted signals $u_i(\omega)$ ($i = 1 \dots n$) and has for outputs the $n+1$ -vector $h(\omega)e(\omega)$.

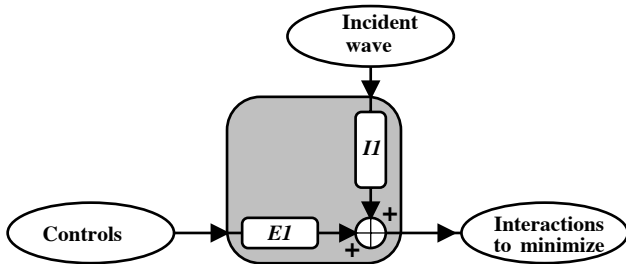


Figure 1: Dynamics of the interactions obstacle/detection system

The criterion corresponds to a measure of the energy (the H_2 norm) of its output. At this point, if we introduce two transfer matrices $I1(s) = (h_{i1}(s))$ and $E1(s) = (h_{ij}(s))$ corresponding to the partition $(w(\omega), u_1(\omega), \dots, u_n(\omega))$

of $e(\omega)$, the interaction dynamics can be seen as it is shown in figure 1.

4 Closed-loop minimization : a standard problem

If in the previous section we made the assumption that we had an explicit knowledge of the function $w(s)$ associated with the incident wave, this is not true in real cases. We will show how, without this knowledge, the preceding factorization can be used to construct a controller minimizing the energy criterion.

4.1 Dynamics of the observations

The actual knowledge on the incident wave is given by its interaction with the obstacle, that is to say by the perturbation generated on the pressure field when the incident wave is reflected by the obstacle. This field of pressure, observed by sensors located on the body of the obstacle, is also modified by the presence of the actuators. This is why it is useful to introduce two transfer matrices, stable, causal, non rational, $I2$ and $E2$, to represent these different influences on the measured pressure. This is shown in figure 2.

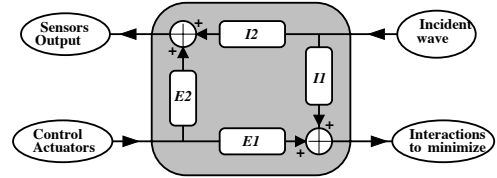


Figure 2: Model of Interactions Wave/Obstacle

Adding these two transfer functions to the coupling model, we obtain a complete dynamic representation of the obstacle and the detection system. The inputs to this system are the control actuators and the form of the incident wave. The outputs are the interactions and the measurements of the sensors.

4.2 Formulation of the active control of an echo

The previous scheme can be interpreted in the context of a standard four-blocks H_∞ minimization problem. From the point of view of the obstacle, the issue can be described as follows :

- the incident wave w is an unknown perturbation;
- the interactions $z = h \begin{pmatrix} w \\ u \end{pmatrix}$, to be minimized, (the coupling terms resulting from the factorization) are the non measurable outputs;

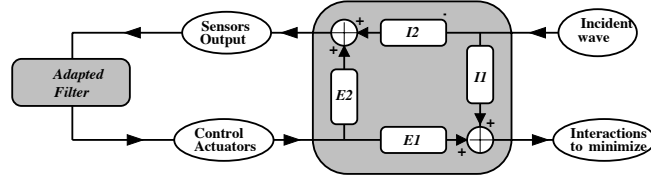


Figure 3: Standard formulation of the active control of an echo

- the only knowledge on the perturbations comes from the measurements from the sensors y ;
- the only controls are sent by the vibrating membranes u .

Thus, we see how the standard formulation of the active control of an echo naturally appears (it is illustrated in figure 3) : the idea is to adapt, with a linear realizable (causal) filter, the emitted control to the measurements from the sensors in order to minimize the unknown perturbation in real-time.

When the filter is given, the closed-loop system characterizes entirely the behavior of the obstacle reacting to the incident wave and defines a strategy for the reduction of the echo as shown in figure 4. Then, the energy criterion is only dependent on the form of the incident wave and on the selected filter.

It is obvious here that, in order to be as realistic as possible, the minimization of the perturbations must be achieved for all possible inputs (to take into account the most unfavorable case). This means that the best anti-sound action corresponds to the

$$\inf_{w \in H_2} \sup \|z\| \quad (5)$$

where H_2 is the Hardy space and $\|z\|$ denotes the H_2 -norm of z .

This corresponds to the minimization of the H_∞ norm of the transfer function of the closed-loop system.

Thus we can state the active control of an echo as the standard problem of *finding a stable and realizable filter which minimizes the H_∞ norm of the transfer function of the closed-loop system.*

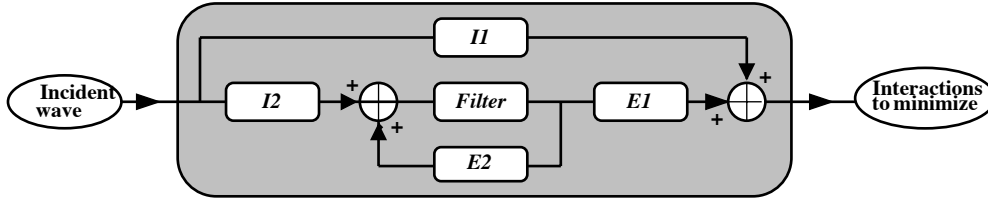


Figure 4: The reduction of an echo

5 Towards a solution for the standard problem

The previous standard problem has an explicit solution in the rational case (see for instance [5] in the frequency case). In the acoustic context, the physical phenomena are described by partial derivative equations (the Helmholtz equations), and the dynamic systems described are of infinite dimension. The standard problem which still makes a sense in infinite dimension, does not have an explicit solution.

This is why, a possible attempt for its resolution could be the use of a two step approach using rational approximation.

Indeed, it is possible to approximate accurately the solution of the Helmholtz equation. From this result, a high order rational approximation for the outer factor $h(\omega)$

can be obtained using LSI-like algorithms. To deduce approximations of the transfer functions $E1$ and $E2$, the rational approximation method for the transfer functions of hyperbolic systems described in [7] can be applied.

The standard problem is then expressed in its rational formulation. An optimal Hankel approximation [1] of its solution is the final step to determine a controller of order less than 10. This phase is still under study.

Another remark concerns the poor knowledge that we have on the energy spectrum. In the case of the anti-sound problem, this spectrum is only partially known on the imaginary axis and asymptotically. There we assume that the use of L^2 identification techniques under constraints [2] would be helpful.

6 Conclusion

We have presented here the problem of the active control of an echo in an original theoretical way, touching upon several up-to-date topics in control. We have shown that the resolution of this anti-sound problem could be decomposed as follows :

1. factorization of the energy spectrum
2. rational approximation of the dynamic system submarine/detection system;
3. construction of the optimal filter by resolution of the standard H_∞ problem.

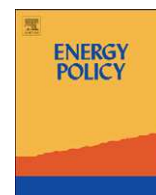
Each of the previous control problem has to be solved in order to find an explicit solution for the active control of an echo.

References

- [1] Adamjan V.M., Arov D.Z. and Krein M.G., Analytic properties of Schmidt pairs for a Hankel operator and the generalized Schur-Takagi problem, *Math. USSR Sbornik*, vol. 15, no. 1, (1971), 31-73.
- [2] Baratchart L., Leblond J. On robust identification from partial frequency data, *Proc. of the 2nd European Control Conference* Groningen, (1993).
- [3] Bordier M. Aspects automatiques du contrôle actif d'écho, *In preparation*.
- [4] Delsarte, Genin, Kamp "Orthogonal Polynomial Matrices on the Unit Circle" *IEEE, Transactions on circuits and systems* vol25-3, (1978).
- [5] Francis B.A. *A Course in H_∞ Control Theory* LNCIS 88 Springer-Verlag (1986).
- [6] Lax-Phillips *Scattering theory* Pure and Applied Mathematics, Academic Press (1967).
- [7] Maïzi N. "A "relaxation" approach for the Hankel approximation of some vibrating structures" *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Volume 185, Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [8] Petkov *Scattering theory for hyperbolic operators* Studies in Mathematics and its applications, North Holland (1989).
- [9] Ramm A.G. *Scattering by obstacle* Mathematics and its Applications, Reidel (1986).
- [10] Rosenblum M., Rovnyak J. *Hardy Classes and Operator theory* Oxford University Press (1985).
- [11] Youla, Kazanjian "Bauer-Type Factorization of Positive Matrices and the theory of the Matrix Polynomials Orthogonal on the Unit Circle" *IEEE Transactions on circuits and systems* vol. 25-2, (1978).

Article [12] relatif au chapitre 4

ménages et carbone



The role of income in energy consumption behaviour: Evidence from French households data

Jean-Michel Cayla^{a,b,*}, Nadia Maizi^a, Christophe Marchand^b

^a Mines ParisTech Centre de Mathématiques Appliquées (CMA, Centre of Applied Mathematics), Sophia-Antipolis, France

^b Electricité de France (EDF R&D), Renardières Site, Morêt sur Loing, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 August 2010

Accepted 20 September 2011

Available online 5 October 2011

Keywords:

Household energy consumption

Investment choice

Energy behaviour

ABSTRACT

The main purpose of this paper is to characterise quantitatively the impact of income on household energy consumption in the residential and transport sectors. Starting from the data collected in a paper survey, we analyse the extent of the constraint experienced by households in terms of equipment purchasing behaviour and daily energy consumption. This analysis shows that the least well-off households are particularly constrained since the share of their budget represented by these energy services is very large (15–25%), and this corresponds to a level of energy service well below that of the better-off households. The case of space-heating shows a factor of 2 in terms of level of comfort achieved between the extreme 10-percentiles. These households also face a strong capital constraint for equipment purchases. This leads either to a large increase in the required rate of return or to a reduction in the proportion of households that are prepared to replace their equipment earlier. The least well-off households are thus doubly constrained, since it is more difficult for them to invest. In our opinion, it is crucial to take into account this observation in the context of political measures aimed at reducing households'CO₂ emissions.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Households do not consume energy for itself but energy services, either at home or for travelling. This consumption of services is embedded in an extremely complex system involving elements of technical, economic, social and psycho-social origin. In the case of the residential sector, it has been shown that the level of energy consumption in a single dwelling may vary largely according to the household behaviour (Moussaoui, 2006). A previous study that we conducted on space heating energy consumption in France emphasises the significant impact of behaviour. Indeed, it seems that about 33% of consumption variations can be attributed to household characteristics (Cayla et al., 2010) which is fairly coherent with Sonderegger's results (1977). Understanding the determinants that govern energy consumption behaviour has thus been the subject of abundant literature for more than 30 years. Amongst all these household variables, it is household income that seems to play the greatest role in energy consumption (Dillman et al., 1983; Black et al., 1985). From an economic point of view, on the one hand, income exerts a large influence on the implicit discount rate used by the household when purchasing equipment,

as shown by Hausman's pioneering work (1979) on air cooler devices or by Goett and McFadden (1982) on space heating systems. On the other hand, it also influences the level of energy consumption via the income elasticity parameter: the higher the income, the higher the energy consumption. In fact, income also plays a role in the type of reduction strategy likely to be adopted by households. Better-off households tend to invest in efficient equipment, whereas the least well-off households tend to curtail their daily energy consumption (Verhallen and Van Raaij, 1981; Black et al., 1985; Bartiaux et al., 2006). From a sociological point of view, a combination of socio-demographic attributes, such as age, type of family, urban/rural area or income constitute households' social classes. These social classes define the ways people live, which in turn result in practices that affect energy consumption. However, amongst these variables, the most important is once again income, or rather the income class, as it remains the major constituent element of social class (Bigot, 2007).

The main purpose of this paper is thus to attempt to characterise quantitatively the impact of income on household energy consumption in the residential and transport fields. In particular, we seek to show the constraint that income places on households relating to both purchasing efficient equipments and daily energy consumption. Section 2 presents the methodology and content of the survey that supports the analyses in this paper. Section 3 looks at the impact of income on daily energy consumption and its impact on the level of comfort. Section 4 deals with the impact

* Corresponding author at: Mines ParisTech Centre de Mathématiques Appliquées (CMA, Centre of Applied Mathematics), Sophia-Antipolis, France. Tel.: +33 686455427.

E-mail address: jeanmichel.cayla@gmail.com (J.-M. Cayla).

Table 1
Calibration variables of the sample.

Variable	Level of detail				
Income	1st quintile	2nd quintile	3rd quintile	4th quintile	5th quintile
Age, head of household	< 40 years	40–65 years	> 65 years		
Home type	House	Flat			
Area type	Rural	Exurban	Suburban	City	
Type of family	Single	Couple, no child	Single and children	Couple and children	
Ownership status	Owner	Tenant			
Date of construction	< 1949	1949–1975	> 1975		

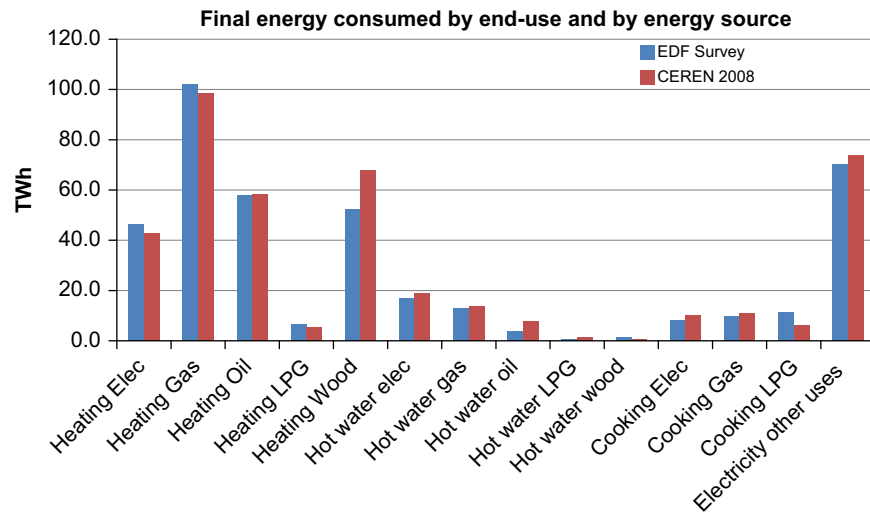


Fig. 1. Residential energy consumption.

of income on equipment choices regarding the return on investment required by households and the replacement rate. Section 5 attempts to break down the behavioural aspect of energy consumption into two distinct types of practise. Section 6 presents our conclusions.

2. Presentation of the survey

2.1. Survey methodology

The paper questionnaire was drawn up in collaboration with the SOFRES polling institute and was sent by mail at the beginning of July 2009 to 3000 households drawn from the SOFRES Métascope panel. The questionnaire consists of a “residential” part, covering the technical characteristics of the building, the equipment and domestic practices, to be completed by the head of the family, and a “transport” part, covering mobility and the use of transport, to be completed by a member of the household over 18 years old chosen at random.¹ This sample was chosen to be representative in respect of the following variables (Table 1).

Upon collection of the questionnaires, 2012 households had completed and returned both parts of the questionnaire, which corresponds to a return rate of 67%. This final sample was then re-weighted on the basis of these same variables so as to be representative of the whole French population.

Regarding energy consumptions and associated expenditure, the amounts were obtained for the whole year 2008 directly by the questionnaire for natural gas, fuel oil, LPG and wood. For electricity,

consumption levels were obtained from the EDF² customer database. Regarding transport, the distances covered according to reason and means of transport were collected from individual questionnaires filled in relating to journeys made. For local travel (< 100 km), respondents filled in information on all journeys made over the last 7 days. For long-distance leisure travel (100–500 km) and very long-distance leisure travel (500–8000+ km),³ respondents filled in information on journeys that took place, respectively, during the last month and the last 12 months. The distances obtained were then converted to fuel use based on the technical characteristics of cars, and transport ticket expenditure on the basis of the price index for public transportation.

2.2. Representativeness of the survey in terms of energy consumption

The graphs below present energy consumption levels for each end-use⁴ and per energy source in the residential sector, as well as the distances covered for local mobility (LM) and long-distance mobility for personal reasons (LDM) by mode of transport, and these are compared with reference data.⁵ Figs. 1 and 2 compare

² EDF stands for “Electricité de France”, the main French electricity utility.

³ Local mobility includes short distance mobility for all purposes that occur during week days or during week-end, including leisure purpose.

⁴ For more details of the methods used to determine energy consumption for each use in cases where one form of energy satisfies several needs, see Appendix A.

⁵ CEREN (Centre for Studies and Economic Research on Energy), INSEE (National Institute of Statistics and Economic Studies) and CCTN (Commission of Accounts of Transport of the Nation) are French organisations that supply reference data on energy consumption in France. For mobility, the CCTN data were adjusted to reflect the population, and airborne mobility to foreign destinations so as to correspond to the scope of the EDF and INSEE surveys.

¹ Working household members have a greater chance of being chosen, resulting in 65% working and 35% out of work respondents in the final sample.

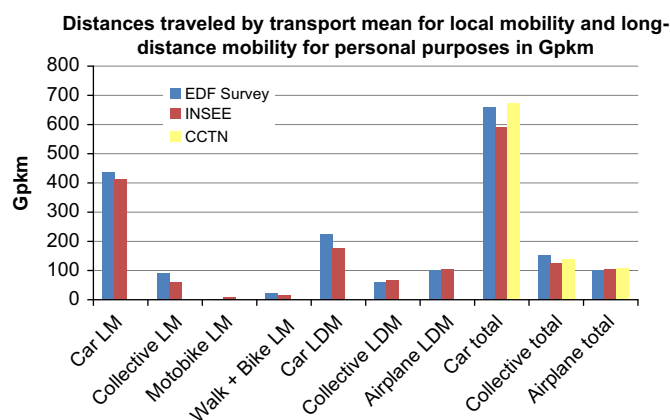


Fig. 2. Local mobility and long-distance mobility, distances travelled.

the results obtained with the EDF survey and French reference databases.

The results relating to energy consumption are very close to the values provided by the major national reference databases. Indeed, we observe very slight differences for total energy consumption and for market shares of the various energy sources and end-uses. This gives us a good indication of the representative nature of the sample used.

3. Household energy bills

3.1. Residential and transport: two primary necessities

Expenditures on energy consumption under the residential heading correspond to the sum of bills supplied by the household, to which we add any charges for heating and hot water for households using a shared heating system. Although these households do not always declare a heating bill, they nevertheless devote a large amount of income to this item. Furthermore, they are frequently tenant households in apartments and thus often less well-off than average. With regard to transport, we limited ourselves to expenditure relating to weekly mobility, i.e. expenditure on fuel for travel during the week and on public transport tickets. These elements were chosen since they are a better reflection of the share of truly constrained consumption than the more commonly used indicator of total fuel expenditure. The latter combines weekly mobility for work or shopping with long-distance mobility for leisure as well as omitting household expenditure on public transport. Those households that use the most public transport are more likely to have no car and are less well-off on average.

It can be seen in Fig. 3 that these two types of expenditure show a similar profile. The amounts involved are fairly close, which corroborates figures already put forward by the INSEE (INSEE, 2008). We can also see three parts to these curves, which correspond to a constraint, an area of elasticity and a beginning of saturation. Indeed, domestic energy and local weekly mobility are essential items of expenditure for households and as such are strongly constrained. We thus see that the level of expenditure does not decrease with income for the poorest 30%: these households commit minimum expenditure in order to be able to live. At the other end of the curve, there appears to be a phenomenon of saturation for the last 20 percent, which is also characteristic of primary necessities. Finally, for households with middle incomes, we see an elastic area where expenditure committed by the household increases with income. The comfort of these households is not saturated and, as their income rises, part of it is

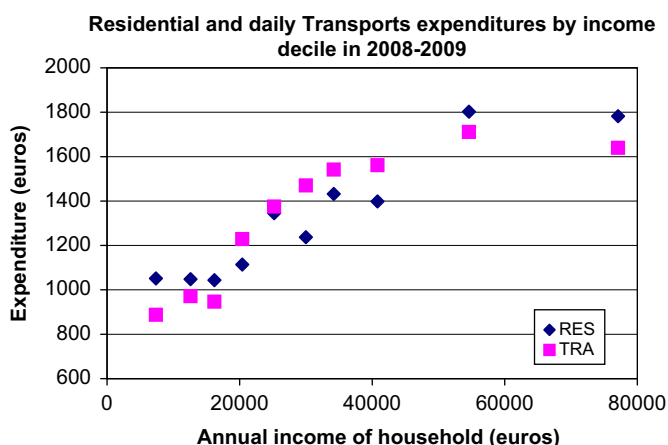


Fig. 3. Household energy expenditures.

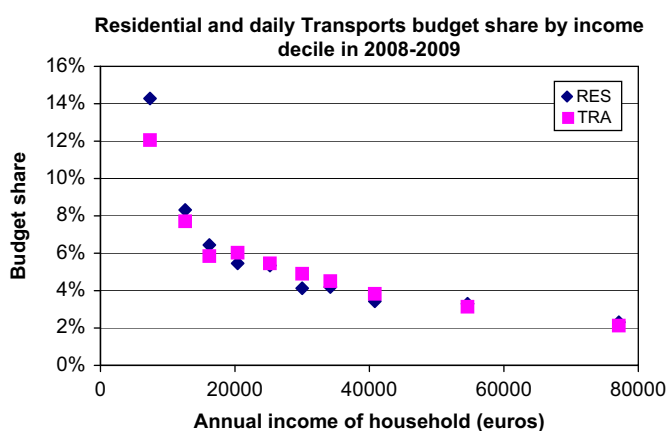


Fig. 4. Budget share of energy expenditure.

allocated to satisfy this need. The slope of the elastic part of consumption, which corresponds to the magnitude of this income-related effect, is roughly the same for the residential and transport items: **1.75%** for transport and **1.82%** for residential. The elastic part of the consumption that we found is coherent with the fact that middle-class households are often more reactive to price variations than low- and high-income households. This is because low-income households are already constrained and might not further reduce their consumption, whereas high-income households are rich enough and do not pay attention to price variations (Verhallen and Van Raaij, 1981) (Fig. 4).

The curves representing the budget shares of the residential and local transport sectors clearly show the income constraint suffered by less well-off households. Minimum expenditure, at about 1000 euros (Fig. 3), denotes an explosion in the share of the budget allocated to domestic energy and travel. This share represents between 2% and 6% of income for the majority of households, but can reach 8% or even 12% to 14% for the less well-off. We can thus make the following observation: a budgetary constraint on the residential item adds to the constraint on the local transport item, so that the less well-off households are constrained on both items at once.

If we now examine household expenditure on long-distance travel (> 100 km) for leisure/holiday purposes, the situation is quite different. Indeed, Fig. 5 shows that there is no minimum expenditure commitment for low incomes and the budget share allocated to long-distance travel remains under perfect control (around 5%).

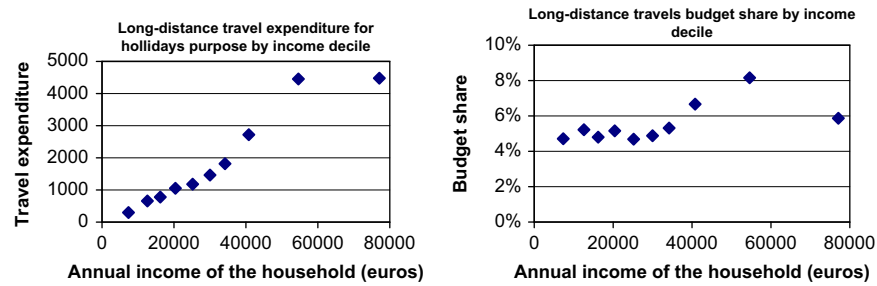


Fig. 5. Expenditure and budget share for long-distance travel.

The shape of these curves is entirely typical of a luxury item and perfectly illustrates, in the context of a policy of constraint on transport, the necessity of distinguishing local weekly travel that is a constraint from long-distance leisure travel.

The existence of a minimum level of expenditure for least well-off households for residential and local mobility purposes leads one to think that these items are primary necessities. And these expenditures weigh much more heavily in the budget of the least well-off households than they do in those of the best-off, in fact we find a ratio of 6–7 between the extreme 10-percentiles in the importance of these budget items. The constraint is then double: the least well-off households consume less energy than the best well-off households and these energy bills have a greater importance in their budget. It is interesting now to see if this difference in energy consumption reflects a difference in energy services consumed, that is to say a difference in level of comfort.

3.2. The case of space heating: income as an indicator of the level of energy service

We are more particularly interested in the case of energy consumption for heating use for several reasons. One reason is that heating represents a high share of energy consumption (70%) and CO₂ emissions in the residential sector and, furthermore, it seems particularly flexible to the extent that we frequently observe rebound effects of 10–30% (Greening et al., 2000). Another reason is that a method exists for calculating heating requirements based solely on thermal considerations. In this method, known as DPE-3CL,⁶ the behaviour of the household is taken into account in a uniform and standardised manner. This method is currently used to define a building's energy label for use in property transactions and is enshrined in French law (Ministère de l'emploi, de la cohésion sociale et du logement, 2006).⁷ The thermal calculation is relatively complex but can be summarised in the following formula⁸:

$$HD = C \frac{ENV * Dh * Surf}{Rdt}$$

where *HD* is the energy consumption in kWh, *ENV* is losses per unit area expressed in W/K m², which depend on the heat loss coefficients and surface areas of the various types of wall surface—masonry walls, opening doors and windows, ceiling, floor—and on ventilation losses, *Dh* is the number of degree-

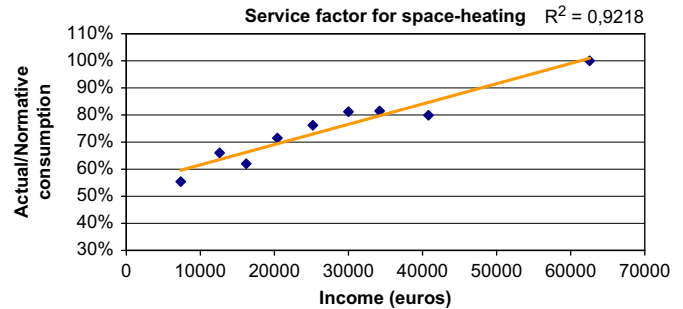


Fig. 6. Service factor for space-heating end-use.

hours of heating, *Surf* is the useful living area, *Rdt* is the overall efficiency of the heating system and *C* is a constant.

It thus seems interesting to compare the estimated space heating consumption⁹ of the household with this normative consumption, especially from an income point of view. It is possible to make this DPE-3CL calculation using the data collected in the survey regarding the technical and thermal characteristics of the building (shape of the building, surface area and degree of insulation of the walls, windows, ceiling and floor, and ventilation system), the meteorological data (number of unified degree-days, altitude, insulation) and the technical characteristics of the heating system (type, age, energy, etc.). Of course, the behaviour of the household in terms of practices – reduction of temperature during the night or while away, unheated rooms, duration of ventilation of the dwelling in winter – play a significant role and would make the real consumption differ from this normative consumption. The graph below shows the ratio between real consumption and normative consumption as a function of income for the various 10-percentiles of income.¹⁰ This ratio between estimated consumption and normative consumption corresponds to a certain level of comfort and is quite similar to the notion of service factor developed by Haas and Biermayr (2000) (Fig. 6).

We can observe a linear impact of income on the level of service factor for space heating purposes. Well-off households do not restrict themselves and heat their whole dwelling to the desired temperature, while the less well-off heat less and adopt reduction strategies. The absolute value of this service factor ratio does not correspond to the coverage of theoretical need, since we could have chosen another reference. In particular, the normative behaviour used in the DPE-3CL calculation considers that each household heats its entire home to 18 °C during the whole

⁶ DPE-3CL stands for “Diagnostic de Performance Énergétique—Calcul Conventions Conventionnelles des Logements”, it is the official method in France to estimate conventional housings consumption in order to label its energy performance.

⁷ For more details of the calculation method, see www.logement.gouv.fr.

⁸ Applying a linear regression between the actual calculation and the simplified formula, we obtain a coefficient $R^2 = 0.996$ for $N = 1980$.

⁹ In cases where the energy bill corresponds to several uses, the share relating to heating had to be estimated (see Appendix A for more details).

¹⁰ Income deciles 9 and 10 have been aggregated because there were too few respondents.

E2 - Imagine now that you proposed to replace in the coming year your current heating system with a more energy efficient level, the cost amounts to € 7000.
At what amount of annual savings on your heating bill you would you be willing to install this new system?

- You are ready to replace him for an annual saving
of euros
- You will not replace your current system ☐

Fig. 7. Extract of questionnaire on equipment choices.

heating season. It is a coincidence that the richest households have a service factor of 100%, it could have been 80% or 120% for instance, because this reference is not a definition of the household's needs. What seems to be of particular interest in our opinion is how this ratio evolves with the income. And in fact, we observe almost a **factor of 2** in terms of level of service consumed for space heating between the first income decile and the last income decile. This observation seems consistent with the income effect shown above (Fig. 3) and helps to quantify the restrictive behaviour adopted by the least well-off households. With regard to the transport sector, the connection between expenditure and the energy service provided seems more difficult to establish. It would nevertheless be interesting to carry out the same type of analysis on mobility needs, by considering, for instance, a standardised travel requirement for each transport motive (e.g. work, shopping, administrative procedures) as a function of the type of infrastructure and to examine the impact of income.

4. Equipment purchasing behaviour under income constraint

In the paper questionnaire, the households surveyed answered a section regarding the replacement of their heating equipment, their refrigerator and their main car when they have at least one. They were asked if they were ready to replace their current system within the following year and using what amount of annual savings they were ready to do so (Fig. 7).

We offered a fixed price consistent with the market – in the case of the heating system, the amount offered of €7000 represents expenditure lying between a high-temperature heat pump and a low-temperature gas boiler – so as to obtain a proportion of positive responses and savings amounts demanded consistent with technologies currently available on the market.

Regarding private vehicles, the respondents had to indicate in advance a price range for the future purchase that they intended to make, given that the base price of a car varies considerably with the range and size of car in question,¹¹ the additional cost offered for an efficient being 2000 euros relative to this base. It is thus possible, from the declared amount of savings, to calculate the proportion that cancels out the current net value of the investment thus used by the respondent. This proportion is not,

strictly speaking, an discount rate but rather a minimum rate of return on investment demanded, as noted by Greene et al. (2004) (Table 2).

The required rate of return a is then usually calculated as the rate that cancels out the NPV of the investment from the amount of Savings filled in by the household.

$$NPV = -Cost + \sum_{i=1}^{Lifetime} \frac{Savings}{(1+a)^i} = 0$$

Figs. 8 and 9 present the variation in income of the proportion of households declaring that they are ready to change their system and the variation in income of the rate of return used by households that are ready to change their equipment.¹²

First of all, it must be remembered that the values obtained are only declarative values. They may not reflect the real behaviour of the households, partly because they do not deal with real market characteristics such as imperfect information or various transaction costs. Nevertheless, the values obtained by this kind of method are not, in general, very far from those obtained by revealed preference methods (Train, 1985). Furthermore, although great attention was given to the formulation of the questions, it is inevitable that the answers given by the households are subject to psychological biases and framing effects (Kahneman, 2003). We can, however, note that the amounts of savings filled in by households do not exceed their actual bill, and that a significant proportion of them answered that they would not change their system instead of filling in an unrealistic amount of savings. This seems to indicate that households are aware that the gain arising from the new system will necessarily be limited, and that some of them that they are not in a position to invest the amount offered in the coming year. These two observations support the idea that households took a close look at their own situations at the time of answering and provided answers in a way that seemed to them realistic.

Regarding the purchase of a refrigerator, we note first of all that the required rate is very high: between 20% and 30% with an average value of **25%**, while the declared replacement rises slightly with income. This value seems very close to that obtained by Hausman (1979) in his work on air conditioners as well as to that obtained by Houston (1983) for “untried, energy-saving durable goods” using a similar paper questionnaire method. The similarity between these studies lies in the fact that the cost of the equipment is of the same order of magnitude: between 100 and 1000 euros, referring back to specific electricity end-uses, with a relatively-low utilisation cost that is unknown to the household.¹³ Households are not particularly constrained by expenditure on refrigeration and do not seem particularly interested in making energy savings by replacing their equipment in advance or by paying an on-cost when replacing their equipment to save electricity. The selection of equipment is in reality a choice between several bundles of attributes, such as size, ease of upkeep, reliability or even appearance. And the energy-saving purchase criterion is sometimes just secondary (Desjeux et al., 1996). For the refrigerator, the low level of importance accorded to energy efficiency is fairly justified economically, given the low weight of refrigeration expenditure in the total electricity bill.

For the heating system, the average value of required rate of return is around **11%**. This seems fairly close to the value of 9% obtained by Sadler (2003), also by questionnaires, but is a fairly long way from the values of around 20–25% usually

¹¹ The size of the vehicle depends largely on the size of the household. Price for the next personal vehicle is given in Appendix C.

¹² Some detail about statistics on these values is provided in Appendix C.

¹³ Households cannot know the precise electricity consumption of a single appliance as they receive an overall bill.

Table 2
Equipment choice items.

Equipment	Cost (€)	Lifetime (years)	Mean required rate of return (%)	Positive answers (%)	Would not replace (%)	No answer (%)
Space-heating	7000	20	11.6	29.8	64.3	8.0
Freezer	400	15	25.3	27.8	61.3	8.9
Personal vehicle	+2000	20	8.7	29.8	54.2	16.0

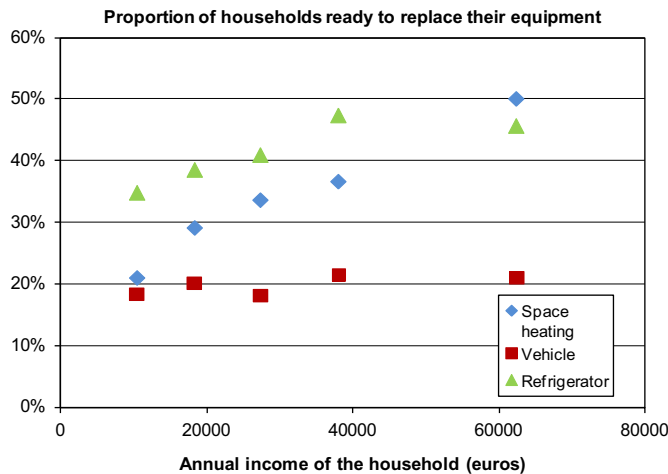


Fig. 8. Share of households that are ready to invest.

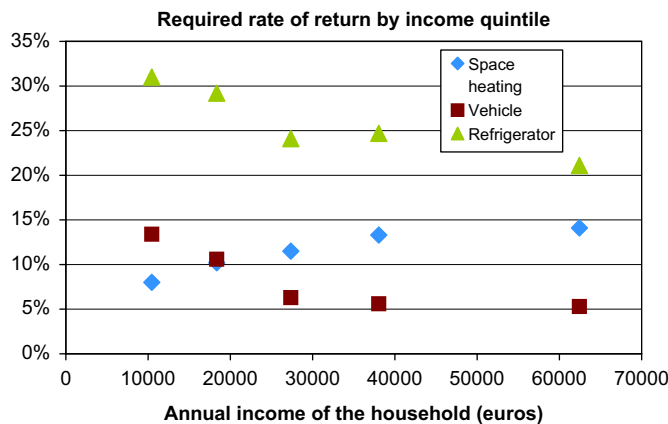


Fig. 9. Required rate of return declared by households.

obtained for this use (Jaffe and Stavins, 1994; Dubin and McFadden, 1984). However, what is more surprising is the fact that the value obtained increases with income. In reality, the value of this rate must be put into perspective with the fact that the declared replacement rate increases very strongly with income, rising from 20% to 50% for well-off households. Taken together, these two curves are explained by two main factors. On the one hand, the least well-off households show a strong interest in reducing expenditure on an item that costs them dear, as we have seen in the previous section and as found by Sadler (2003), which is in line with the low values observed for the first income quintile. Nevertheless, these households are constrained by access to capital and only 20% of them are ready to invest. On the other hand, 50% of well-off households are prepared to change their system, which means that a large share of them are prepared to replace their equipment early, i.e. before the end

of its lifetime. For households whose system has reached its end of life, the cost of the proposed investment is, in reality, an on-cost relative to other, less expensive systems, while for those whose system is more recent, there is an option value to wait (Pindyck, 1991; Hassett and Metcalf, 1993). This explains why households that decide to replace their system early have a higher required return on investment to the extent that they would have been able to invest their money elsewhere and at lower risk.

We can thus imagine that this generally increasing rate is the sum of two rates used by two categories of household: a fairly low rate used by the 20% of households that plan to change their system soon, the value of which could decrease with income, as for the car, and a fairly high rate used by households that change early and consider the purchase of new equipment as a standard investment. The demanding behaviour of investors without capital constraint would thus explain the rising value of this rate. It would be interesting, in order to test this hypothesis, to ask the same question again but this time including elements on the perceived age of the current heating system and the number of years that the household expects to wait before renewing its equipment.

Finally, regarding private cars, the declared replacement rate remains constant with income at around 20%, and the required rate of return decreases with income for an average value of nearly 9%, which seems slightly low compared with the values obtained by other studies on the subject: 11–17% (Dreyfus and Viscusi, 1995) and 4–40% (Greene, 1983). In the case of the car, the results obtained thus imply that equipment renewal is not considered as an investment in the same way as heating is. Indeed, despite the high budget share represented by fuel, this is certainly largely explained by the fact that purchase criteria such as range, comfort, engine power, brand and the image conveyed by the equipment are much more important than fuel consumption (Clochard et al., 2008). As noted by Douglas and Isherwood (1979), “objects are always involved in social processes of cultural distinction, identity building and belonging that far exceed their material function alone”. This is particularly true for cars, which are very visible assets.

To sum up, the graphs of required rate of return and declared renewal rate must be set against each other. Thus, the fact that the required rate of return varies according to final use is not inconsistent, it simply illustrates the fact that the energy efficiency criterion – the only one easily quantified – does not carry the same weight as the other decision criteria for all these various uses (Winer, 1997). Rather than the absolute values of rates and renewal shares obtained by this method, what seems interesting to us is the way in which they vary with income. In particular, in the case of heating, the rising renewal share reflects very well the magnitude of the capital constraint suffered by the least well-off households. This constraint of access to capital restricts the overall amount of expenditure that the household can afford, which leads to a restriction of the technologies accessible at their initial price. However, this also implies trade-offs between uses, with the result that households cannot pay for refurbishments and change their car at the same time.

Table 3
Practices related to domestic energy consumption.

Description	1	2	3	4	Type
Temperature in the main room during winter	≤ 16 °C	17–19 °C	20–22 °C	≥ 23 °C	Intensity
Part of house not heated	> 50%	25–50%	0–25%	0%	Intensity
Temperature reduction during half-day vacancies	Always	Often	Sometimes	Never	Management
Temperature reduction during week-end vacancies	Always	Often	Sometimes	Never	Management
Temperature reduction during week vacancies	Always	Often	Sometimes	Never	Management
Temperature reduction at night	Always	Often	Sometimes	Never	Management
Duration of ventilation per week	≤ 35 min	36–105 min	106–135 min	≥ 135 min	Management
Number of baths per person per week	0	0.5	1	> 1	Intensity
Total duration of showers per person per week	≤ 35 min	36–70 min	71–105 min	≥ 135 min	Intensity
Water runs constantly during showers	No	Sometimes	Yes	Yes	Management
Morning and night coolness is used to cool dwelling during summer	Often	Sometimes	No	No	Management
Shutters/blinds are closed at night	Often	Sometimes	No	No	Management
Light is kept on when the room is empty	Never	Rarely	Sometimes	Regularly	Management
Light is used during daytime	Never	Rarely	Sometimes	Regularly	Management
Frequency of washing machine per week	< 1	1	2–6	≥ 7	Intensity
Washing machine is full when using	Yes	Unaware	No	No	Management
Temperature of washing machine	≤ 30 °C	40 °C	60 °C	90 °C	Management
Frequency of dishwasher per week	< 1	1	2–6	≥ 7	Intensity
Dishwasher is full when using	Yes	Unaware	No	No	Management
Duration of use of TV and computer	≤ 3 h	4–5 h	6–7 h	≥ 8 h	Intensity
TV is on when nobody is watching it	Turned off	Standby	Screen off	Turned on	Management
Computer is on when nobody is using it	Turned off	Standby	Screen off	Turned on	Management

5. Intensity of service and energy management: the two facets of daily behaviour

The importance of the various practices relating to energy consumption is preponderant and we might be tempted to analyse the determinants of these practices in detail. However, it is very difficult to explain the adoption or otherwise of any one particular practise using socio-demographic variables alone. Many relatively complex models have been built to try to explain the causal chain of the adoption of a behaviour pattern. Amongst these, we can mention the Value-Belief-Norm model produced by Stern et al. (1999) or the Theory of Planned Behaviour proposed by Ajzen (1991). Undertaking a given practise closely depends on individual intentions to act and the perceived feasibility of the action (Corraliza and Berenguer, 2000). These intentions depend on individual attitudes to this action, guided by values, especially environmental concerns, and more collective aspects connected with social norms (Ajzen, 1991; Bamberg, 2003). We can see the difficulty of collecting these various qualitative determinants in a detailed and robust manner, especially if each action is to be studied. On the other hand, it seems interesting to establish a behavioural profile by considering a set of domestic practices. In the context of managing budgetary items relating to energy, households seem to pick through a repertoire of possible practices. The overall trade-offs between cost and comfort and the resulting energy savings thus seem to be more easily explained by the combinations of socio-demographic attributes that define social classes (Moussaoui, 2005).

Households were asked to answer questions regarding their domestic energy practices in a section of the survey. We separated these practices into those relating to intensity of use and those relating to energy management. For example, the weekly number of washing machine uses relates to intensity, while using a wash temperature of 30 or 40 °C relates more to management. We have thus collected 22 domestic practices that we have ranked from 1 (very low-energy) to 4 (very energy-intensive) (Table 3).¹⁴

It is now possible to establish, for each household, an overall management and intensity score from 1 (very low-energy) to 4

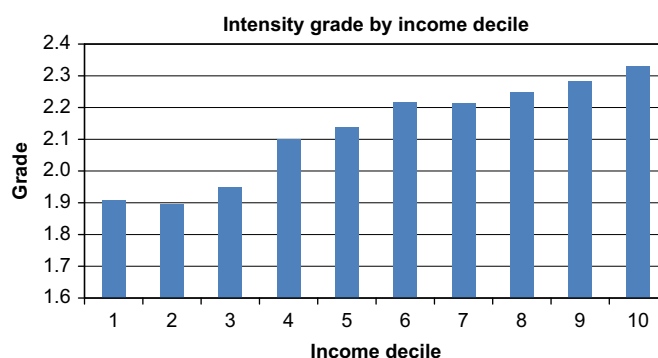


Fig. 10. Intensity score by income decile.

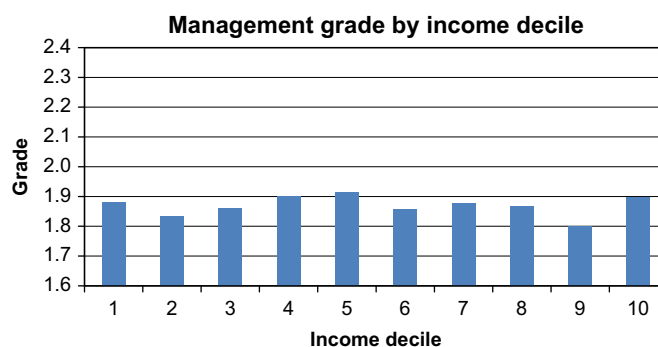


Fig. 11. Management score by income decile.

(very high-energy) by adding the scores obtained for the various practices. We then compare average scores obtained for households according to their income deciles (Figs 10 and 11).

We observe a score difference of nearly 0.5 between the extreme income deciles and a net decreasing effect of income on the energy intensity score. This means that the better-off the household, the more it tends to intensify its use of energy-consuming services. This observation is in line with that made previously regarding a lifting of the energy constraint as income increases.

¹⁴ Practices answered on 3 levels are rated as follows: 1–2.5–4, in order to be comparable with the other practices answered on 4 levels.

Conversely, when we examine the effect of income on the average management score, we see that it is nil, and that the fact of taking care to turn off lights, standbys or reduce the temperature of the home during absences has nothing to do with being rich or poor. Although these practices help to reduce energy consumption, they do not seem to be adopted as a priority by low-income households with an objective of limiting their consumption.

We then carried out a multi-linear regression to try to explain the variance of the intensity score on the one hand and the variance of the management score on the other. The variables tested were the classic socio-demographic variables relating to the household and the values of the reference person in the household. These values are those described by Schwartz (1992); they were collected in the questionnaire using a portrait method comprising 27 questions drawn up for France by Wach and Hammer (2003).¹⁵ The scores attributed to each of the values by the respondent were then centred relative to the average score attributed by the individual to the various values.

With regard to the intensity score, it is pretty much determined by socio-demographic variables¹⁶: income, of course, but also age and type of family; we obtained a coefficient $R^2=0.19$. This is in line with the notion of a need that is more or less satisfied by way of the cost/comfort trade-offs made by the household.

On the other hand, the management score is not well explained; we obtained a coefficient $R^2=0.05$ and it can be seen that the role played by these socio-demographic variables, except for age, is greatly diminished. Either they are statistically insignificant or their impact remains low. The variables for which impact ultimately seems the most significant, although overall regression is poor, are the Schwartz values associated with the two axes, self-transcendence/self-enhancement and openness to change/conservatism. This can be explained by the fact that, in the behaviour models described at the beginning of this section, values influence the formation of attitudes that themselves play a major role in explaining behaviour.

This impossibility to explain energy management behaviour using the socio-demographic variables alone is particularly in line with a concern for energy that is more related to education, environmental concerns or even social norms as noted by Bartiaux et al. (2006) and Shove (2003).

Ultimately, a change in household income would certainly lead to a change in its energy consumption through a change in the intensity of energy service consumption, i.e. through changes in the cost/comfort trade-offs made within the various consumption items. On the other hand, the household's daily energy management would no doubt remain more stable over time. Indeed, once adopted, these daily practices relating to the management (or non-management) of energy become habits that it is fairly difficult to change (Desjeux et al., 1996). These two facets of energy consumption practices reflect very different mechanisms in the action and different possible changes in behaviour over time.

6. Conclusion

The survey we have conducted here is quite interesting as we have included technical variables and behavioural variables. We have then been able to characterise quantitatively the influence of household income on energy consumption and it appears that the

constraint exercised by lack of resources seems particularly strong and exert various effects on household behaviour that should be considered in the design of energy policies. In the context of a strong CO₂ emissions reduction a carbon tax seems of particular interest as it would guide households to invest in more efficient equipments and to reduce their consumption for carbon-intensive services such as take plane for leisure. But the efficiency of such a tax may be largely reduced if additional policies are not considered.

First we have seen that the least well-off households are not in a position to make investments in higher performing equipment that would enable them to reduce their energy bills. In fact, they are highly constrained in terms of access to capital, which is particularly well illustrated in the case of purchasing heating systems. For those deprived households the establishment of a carbon tax would lead only to a welfare loss and an explosion of budget shares allocated to primary goods. It thus seems a matter of priority to favour access to capital for the most deprived, whether by means of subsidies, grants or of zero-rate loans in favour of efficient technologies.

Nevertheless, facilitating access to capital for deprived households would not be sufficient to reduce CO₂ emissions. Indeed, given the low level of satisfaction of needs for those households, it seems almost certain that we will have to deal with a strong rebound effect. This phenomenon of catch-up on the level of comfort seems fairly independent of the level of consumption in absolute value, since such low-income households also aspire up to catching up with middle-class living standards (Bigot, 2007). Thus, facilitating access to efficient equipment should be backed up with policy tools to discourage increased use of the equipment, such as progressive tariffs. This tool would have the advantage of enabling everyone to meet their basic needs while limiting the impact of the income thus released and moving towards a genuine reduction of CO₂ emissions.

With regard to high incomes, there appears to be a very small, even non-existent increase in such expenditure in line with income. We can thus expect almost zero rebound effect in the event of increased efficiency of equipment. But the problem lies in the fact that households do not seem always interested in efficient products, it is especially the case for refrigerators or washing machines. Indeed when the budget share dedicated to an item is low the motivation to make energy savings would necessarily be limited. In order to deal with this lack of motivation it would therefore worth establishing minimum standards in term of energy efficiency. Furthermore, even if these households are interested in energy efficient products their choice is guided by other criteria that may be at least as important as energy efficiency (Mahapatra and Gustavsson, 2008; Clochard et al., 2008). Then a solution may consist to associate energy efficiency with attributes sought by households, such as simplicity, aesthetic or comfort. One way to achieve this goal may be to impose a quota on energy efficient equipments sales to manufacturers. They would then be motivated to associate energy efficiency criterion with attributes sought by households.

Table 4
Multi-linear regression for specific electricity consumption.

Variable definition	Estimate	Pr > t
Useful living area m ²	15.4	< 0.0001
Number of people	392.6	< 0.0001
Number of appliances	104.1	0.0030
No independent freezer	−188.2	0.0385
No clothes dryer	−158.1	0.1051
No dishwasher	−231.7	0.0155

¹⁵ The questionnaire comprised items relating to rational truth and irrational truth values in addition to the traditional items used by Schwartz.

¹⁶ For more details of the multi-linear regressions, see Appendix B.

Table 5
Importance of variables in explaining behaviour grades.

Variable definition	Scale for variable	Intensity $R^2=0.19$		Management $R^2=0.05$	
		Pr > t	Estimate	Pr > t	Estimate
Intercept		< 0.0001	2.146	< 0.0001	1.801
Type of housing—house	0–1	0.0013	0.032	< 0.0001	–0.041
Income decile	1–10	< 0.0001	0.023	0.8529	–0.000
Age	1–4	< 0.0001	–0.046	< 0.0001	0.0697
Presence of children	0–1	< 0.0001	–0.073	0.0271	–0.016
Family is a couple	0–1	< 0.0001	–0.089	0.1836	–0.013
Area type—rural	0–1	0.0280	–0.043	0.2167	0.020
Area type—exurban	0–1	0.1140	0.025	0.3370	–0.024
Area type—suburban	0–1	0.3110	0.009	0.7705	0.017
Ownership status—owner	0–1	0.0450	0.023	0.6318	–0.004
Self-transcendence vs self-enhancement values ^a	–1.7–4.8	0.1319	–0.030	< 0.0001	–0.050
Openness to change vs conservative values ^a	–3.3–3.5	0.1822	0.013	0.0002	0.018

Bold corresponds to variables with significance level < 0.01.

^a For detailed explanation about these indicators refer to Wach and Hammer (2003).

Nevertheless the impact of a carbon tax may also be limited as there is a set of practices relating to daily energy management that is not subject to income constraint, but is rather connected with social norms or cultural aspects. The adoption of these energy management practices, however, represents an important source of energy savings. This potential could be addressed with the help of awareness-raising campaigns and an emphasis on “good” practices in order to change household behaviour. Nevertheless, these practices are rooted in a complex socio-cultural context and the message sent to households by these campaigns should target each kind of practice and each kind of household. General information campaigns seem to be ineffective (Abrahamse, 2007).

It would be also important to note that policies based on collective choice may be complementary tools to reduce CO₂ emissions. In fact, some investment decisions have to be made at collective scale. For instance, in the residential sector the refurbishment of flats is decided by a joint ownership and in the transports sector, the establishment of new collective transports is decided on the basis of collective needs for transportation. Moreover some initiatives to promote behavioural changes are more effective when they are carried out collective rather than individual level, as work done on community-based social marketing tends to prove (McKenzie-Mohr, 2000).

Finally, this study gives some insights about pertinent and complementary policies to establish, as it deals with different aspects of income role in household behaviour. It also provides insights in order to adjust policies to each kind of households. Furthermore, this study would also be very helpful to quantify household behaviour in long-term energy models, such as MARKAL/TIMES models, and to address the problem of household heterogeneity both in purchase of equipments and in daily energy consumption.

Appendix A. Method of estimating heating consumption from declared bills

We used a regression methodology developed by CEREN (2007) for hot water (HW) and cooking end-uses. For other specific electricity end-uses¹⁷ we ran a multi-linear regression ($R^2=0.81$) among the households on our panel ($N=348$) that employ electricity only for these uses (Table 4).

¹⁷ This includes lighting, cooling, cleaning and multimedia end-uses for instance.

Table 6
Descriptive statistics about data used from the survey.

Income decile	Residential expenditure			Transports expenditure		
	Size	Standard deviation	Average	Size	Standard deviation	Average
1	125	736	902	113	897	888
2	176	657	940	157	916	971
3	232	638	911	239	850	947
4	244	669	967	259	895	1229
5	256	873	1120	274	1001	1375
6	202	633	1090	222	1262	1470
7	149	853	1219	161	1475	1542
8	216	1012	1199	232	1340	1562
9	109	1069	1416	126	1282	1711
10	56	1133	1603	69	1115	1640
	Long distance travels expenditure			Service factor for space heating		
1	144	655	297	64	0.37	0.55
2	200	1452	658	92	0.57	0.66
3	270	1559	777	109	0.41	0.62
4	276	2102	1052	125	0.60	0.71
5	286	2244	1181	154	0.55	0.76
6	230	2896	1465	130	0.64	0.81
7	163	3188	1817	88	0.58	0.82
8	235	4152	2719	127	0.48	0.80
9	126	5736	4454	96	0.66	1.00
10	69	6382	4479			
	Intensity grade			Management grade		
1	137	0.38	1.91	137	0.37	1.88
2	198	0.40	1.89	198	0.35	1.83
3	260	0.43	1.95	260	0.36	1.86
4	270	0.44	2.10	270	0.37	1.90
5	278	0.45	2.14	278	0.36	1.91
6	229	0.47	2.22	229	0.36	1.86
7	162	0.45	2.21	162	0.37	1.88
8	229	0.46	2.25	229	0.38	1.87
9	124	0.41	2.28	124	0.38	1.80
10	69	0.49	2.33	69	0.37	1.90
	Amount for space heating			Amount for refrigerator		
1	64	972	697	53	87	130
2	147	973	809	149	91	124
3	165	1144	961	187	86	105
4	139	1073	984	209	83	107
5	91	987	1002	120	83	95
	Amount for vehicle			Price for next vehicle		
1	122	940	770	260	4550	8436
2	171	754	766	470	5626	10,877
3	146	566	653	471	5747	12,744
4	114	665	622	378	6369	14,608
5	53	664	805	181	7450	17,443

We then deduced the space heating energy consumption SH for each fuel type i .

$$SH_i = Total_i - DHW_i^a - Cooking_i^a - Other_i^b$$

a: estimated with CEREN methodology; b: estimated with a multi-linear regression ran on survey panel

Appendix B. Results of regressions carried out to explain the energy intensity and management scores

Table 5 below shows the t -values for the two multi-linear regressions aimed at explaining the intensity score and the management score and the values of the associated coefficients. We can consider that the variable plays an important role if its coefficient is high with respect to the range of variation of the value taken by this variable and if its t -value is small, which means that its impact is statistically validated.

Appendix C. Statistics on data used from the survey

Table 6 presents some descriptive statistics about the data used in this paper: size of the sample, average value and standard deviation per income decile or income quintile.

References

- Abrahamse, W., 2007. Energy conservation through behavioural change: examining the effectiveness of a tailor-made approach. PhD Thesis, Groningen University.
- Ajzen, I., 1991. The theory of planned behaviour. *Organizational Behaviour and Human Decision Processes* 50, 179–211.
- Bamberg, S., 2003. How does environmental concern influence specific environmentally related behaviours? A new answer to an old question. *Journal of Environmental Psychology* 23, 21–32.
- Bartiaux, F., Vekemans, G., Gram-Hanssen D. et al., 2006. Sociotechnical factors influencing residential energy consumption. SPSPDII, SEREC.
- Bigot, R., 2007. Une comparaison des hauts-revenus, des bas-revenus et des classes moyennes. *Cahier de Recherches* no 238 CREDOC.
- Black, J.S., Stern, P.C., Elsworth, J.T., 1985. Personal and contextual influences on household energy adaptations. *Journal of Applied Social Psychology* 15, 3–21.
- Cayla, J.M., Allibe, B., Laurent, M.H., 2010. From practices to behaviors: estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption. *ACEEE Summer Study Proceedings on Energy Efficiency in Buildings 2010*.
- CEREN, 2007. Estimation des consommations de gaz à usage eau chaude sanitaire et cuisson. *Etude* 7107.
- Clochard, R., Rocci, A., Desjeux, D., 2008. Automobilités et Altermobilités: Quels changements?. L'Harmattan, Paris.
- Corraliza, J., Berenguer, J., 2000. Environmental values, beliefs and actions : a situational approach. *Environment and Behaviour* 32 (6), 832–848.
- Desjeux, D., Berthier, C., Jarrafoux, S., et al., 1996. *Anthropologie de l'électricité*. L'Harmattan, Paris.
- Dillman, D.A., Rosa, E.A., Dillman, J.J., 1983. Lifestyle and home energy conservation in the United States: the poor accept lifestyle cutbacks while the wealthy invest in conservation". *Journal of Economic Psychology* 3, 299–315.
- Douglas, M., Isherwood, B., 1979. *The World of Goods. Towards an Anthropology of Consumption*. Routledge, London.
- Dreyfus, M.K., Viscusi, W.K., 1995. Rates of time preferences and consumer valuations of automobile safety and fuel efficiency. *Journal of Law and Economics* 38, 79–105.
- Dubin, J.A., McFadden, D., 1984. An econometric analysis of residential electric appliance holdings and consumption. *Econometrica* 52 (2), 345–362.
- Goett, A., McFadden, D., 1982. Residential End-Use Energy Planning System (REEPS), Report EA-2512, Electric Power Research Institute. 3412 Hillview Avenue, Palo Alto, CA 94303, USA.
- Greene, D.L., 1983. A note on the implicit consumer discounting of automobile fuel economy. reviewing the available evidence. *Transportation Research Part B—Methodological* 17, 491–498.
- Greene, D.L., Duleep, K.G., McManus, W., 2004. Future potential of hybrid and diesel powertrains in the U.S. Light-duty vehicle market. Working Paper.
- Greening, L., Greene, D.L., Difiglio, C., 2000. Energy efficiency and consumption – the rebound effect – a survey. *Energy Policy* 28, 389–401.
- Haas, R., Biermayr, P., 2000. The rebound effect for space heating. Empirical evidence from Austria. *Energy Policy* 28, 403–410.
- Hassett, K.A., Metcalf, G.E., 1993. Energy conservation investment: do consumer discount the future correctly? *Energy Policy* 21 (6), 710–716.
- Hausman, J.A., 1979. Individual discount rates and the purchase and utilization of energy-using durables. *Bell Journal of Economics* 10, 33–54.
- Houston, D.A., 1983. Implicit discount rates and the purchase of untried, energy-saving durable goods. *Journal of Consumer Research* 10, 236–246.
- INSEE, 2008. INSEE Première no 1176.
- Jaffe, A.B., Stavins, R.N., 1994. The energy paradox and the diffusion of conservation technology. *Resource and Economics* 16, 91–122.
- Kahneman, D., 2003. Maps of bounded rationality; psychology for behavioural economics. *American Economic Review* 93 (5), 162–168.
- Mahapatra, K., Gustavsson, L., 2008. An adopter centric approach to analyze the diffusion patterns of innovative residential heating systems in Sweden. *Energy Policy* 36, 577–590.
- McKenzie-Mohr, D., 2000. Promoting sustainable behaviour: an introduction to community-based social marketing. *Journal of Social Issues* 56 (3), 543–554.
- Ministère de l'Emploi, de la Cohésion sociale et du Logement 2006, Arrêté du 09 November 2006 NOR :SOCU 0610563A <www.logement.gouv.fr>.
- Moussaoui, I., 2005. Maîtriser son confort, rendre confortable sa maîtrise : gestion des flux domestiques, maîtrise de l'énergie et valeurs de modération chez les familles propriétaires. Working paper EDF R&D.
- Moussaoui, I., 2006. La maîtrise de l'énergie : comment passer d'une vision "entreprise" à une vision "client"? Etat de l'art bibliographique des études SHS, Working paper EDF R&D.
- Pindyck, R., 1991. Irreversibility, uncertainty and investment. *Journal of Economic Literature* 29 (3), 1110–1148.
- Sadler, M., 2003. Home energy preferences & policy: applying stated choice modelling to a hybrid energy economic model. Master Thesis, Simon Fraser University.
- Schwartz, S., 1992. Universals in the content and structure of values: theoretical advances and empirical test in 20 countries. *Advances in Experimental Social Psychology* 10, 221–279.
- Shove, E., 2003. *Comfort, Cleanliness and Convenience; the social Organization of Normality?*. Berg, Oxford and New York.
- Sonderregger, R.C., 1977. Movers and stayers: the resident's contribution to variation across houses in energy consumption for space heating. *Energy and Buildings* 1, 313–324.
- Stern, P.C., Dietz, T., Abel, T., et al., 1999. A value-belief-norm theory of support for social movements: the case of environmentalism. *Human Ecology Review* 6 (2), 81–97.
- Train, K., 1985. Discount rates in consumer's energy-related decisions: a review of the literature. *Energy* 10 (12), 1243–1253.
- Verhallen, T., Van Raaij, F., 1981. Household behavior and the use of natural gas for home heating. *Journal of Consumer Research* 8, 253–257.
- Wach, M., Hammer, B., 2003. La structure des valeurs est-elle universelle?. L'Harmattan, Paris.
- Winer, R.S., 1997. Discounting and its impact on durable buying decisions. *Marketing Letters* 8 (1), 109–118.

Article [47] relatif au chapitre 4

prospective et vecteur électrique

Long-term planning and the sustainable power system: a focus on flexibility needs and network reliability

Nadia Maïzi, Vincent Mazauric, Edi Assoumou and Mathilde Drouineau

Abstract—Long-term planning models are useful to describe future energy and technology options and to analyze environmental issues. They propose solutions for meeting future energy consumption. Focusing on the electricity sector, we argue that in order to provide a more relevant assessment of the power supply system ahead we need to tackle both flexibility needs and network reliability.

On the one hand, flexibility is integrated in long-term planning models as an additional criterion for new investment decisions: it allows electricity generation capacity with short start-up periods to be part of the mix to satisfy peak demand, despite their higher marginal costs in comparison with the cost of base load technologies.

On the other hand, and in order to assess network reliability, a suitable representation of dynamic dissipative processes over the electrical network is necessary. We introduce the notions of conveyance and reliability losses and their qualitative impacts on power transmission. We propose a methodology to exhibit the level of losses associated with a given level of reliability, whether generation capacities are centralized or decentralized. Our methodology is based on a thermodynamic description of the electric system and lumps it into a “one-loop grid”. It provides a figure for the amount of reactive power and kinetic reserve needed to ensure network reliability and face admissible load fluctuations.

Keywords: — Energy planning. Thermodynamics. Electrical power. Transmission grid. Optimization —

I. INTRODUCTION

Electricity is a very convenient way to deliver huge amounts of power in areas where demand is concentrated. Due to the predicted population densification, electricity consumption is set to significantly increase over the next decades. The International Energy Agency has estimated that US\$ 10 trillion US will be spent during the next thirty years on the generation, transmission and distribution of electrical power, in order to replace existing capacities in developed countries, or to accompany the development of energy markets, or to substitute energy vectors that are less clean or growing scarce [16]. In this context, two essential features challenge forthcoming changes in the power system: (i) the emergence of different paradigms for serving electricity than those for which the system was designed [7]; (ii) the will to improve the energy efficiency of electrical power transmission, given that the current system clearly lacks efficiency (e.g. electrical losses

are twice as high as electricity consumption was in 1950 as pointed out in [12], and illustrated in figure 1 for the residential and industrial sector in the US).

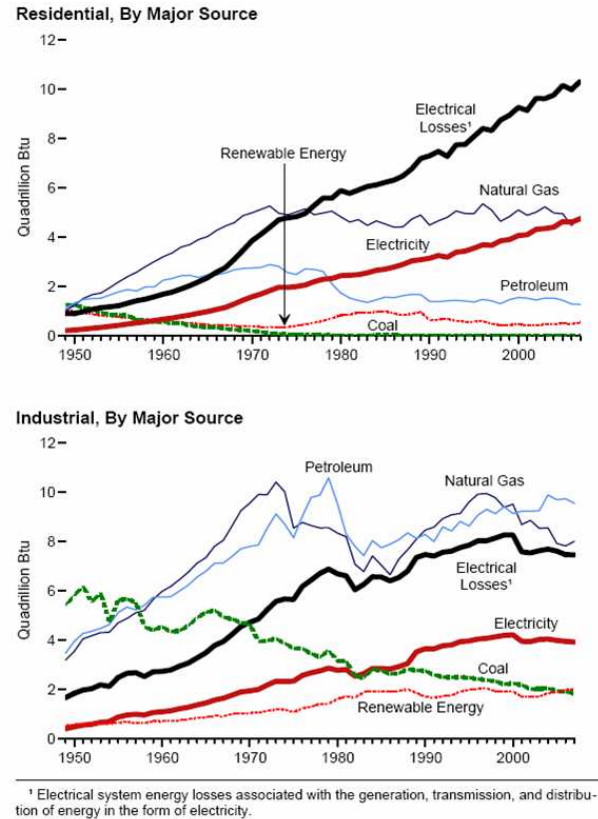


Fig. 1. Residential and Industrial Total Energy Consumption, Major Sources [12]: electricity use (and related losses) expanded dramatically.

Moreover, the world net generation of electricity increasingly relies on fossil fuels as shown in figure 2, which implies a higher impact on the environment due to the level of greenhouse gas emissions emitted by the electrical sector.

These issues stress the need for assessing future electrical power systems. Models for energy planning have proven useful to determine a plausible evolution of the energy sector in the mid -to- long term in the face of strong environmental pressures, such as carbon mitigation or fossil energy depletion. Issues such as pointing out the main drivers of the energy system at a given regional scale, anticipating changes in and impacts of energy prices, and estimating pollutant emissions, require models of substitution possibilities throughout the

N. Maïzi, E. Assoumou and M. Drouineau are with MINES ParisTech, Centre for Applied Mathematics, BP n° 207, 06904 Sophia Antipolis cedex, France.

V. Mazauric is with Schneider Electric, Innovation Dept., 38TEC/T3, 38050 Grenoble cedex 9, France.

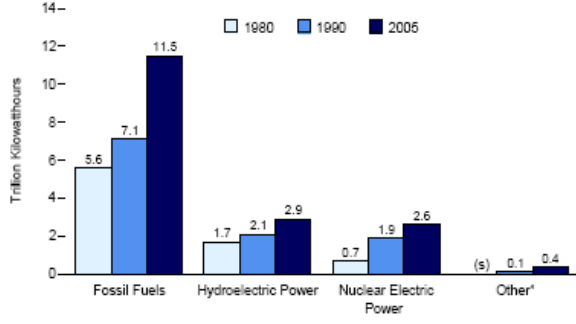


Fig. 2. Net Generation by Type, 1980, 1990, and 2005 [12]

whole energy chain. The MARKAL (MARKet ALlocation) type of technology-rich models provide a partial solution to this problem [4], [13], [1]. However, in order to assess the sustainability and robustness of these energy planning model results, it is necessary to give a suitable description of the time and space constraints of electricity generation systems.

Spatial constraints relate to the geographical distribution of the power plants, the structure and availability of the transmitting network, and the location of demand.

Time constraints relate to the electric current and the management of the network in order to minimize the variations in tension and frequency at any time, while keeping the system within safety limits. After recovering stationary behavior, the total electric power supplied by the stations must be equal to network demand. In order to ensure this power balance, electricity production modes will be chosen for their dynamic nature and for their location in the network.

In section II, we explore the limit of the actual MARKAL modeling approach for the electricity sector. Then, section III presents an augmented MARKAL model that introduces flexibility as an additional criterion for electricity generation investments: the choice of power stations relying on a cost minimization is then tempered by technical constraints.

In section IV, the need for reliability assessment on the power network is described. In section V, we present how a methodology based on a thermodynamic approach enables the description of the power transmission grid in a comprehensive and synthetic way. Section VI then provides a conclusive discussion, in which we present how this method can be adapted to network reliability assessment and implemented in energy planning models such as MARKAL.

II. LIMITATIONS OF THE LONG-TERM PROSPECTIVE MODELING

Long-term global prospective models permit the assessment of multi-sectoral energy policies and are therefore persuasive. Among these models, MARKAL is a technological model developed since the mid-eighties [4] under the auspices of the International Energy Agency [13]. MARKAL, in its basic version, is a technically optimum model. It relies on an explicit formulation of the input/output relationships for each technology and minimizes - over the chosen time horizon and for a given final outcome - the actualized global cost. The decision variables depend on the choice of the activity level

of technologies, and of capacity investments. The equilibria of energy flows are generally expressed over the year and evaluated on total energy rather than on hourly power demand. MARKAL offers a more detailed description for the electricity sector, whereby flows are represented as energy units. Specific technical constraints [15] are represented in the model:

- *Flow equilibrium constraints:*

Electricity and heat are represented in more detail in the model. The time divisions applied to these two energy vectors are shorter and each period is broken down into six sub-periods showing the combinations between, on the one hand, three seasons (summer, winter, intermediate), and on the other hand, day and night. The flux equilibrium equations are then published separately for each of these sub-periods.

- *Peak reserve capacity constraints:*

The peak reserve constraint therefore guarantees the setting-up of a supplementary capacity reserve to show what level of over-capacity is actually necessary to cope with high demand periods. In such cases, the user stipulates a global electricity or heat reserve factor. Each electricity or heat production technology is then represented by a supplementary coefficient of participation (of the technology's capacity) in the realization of the reserve. This coefficient (from 0 to 1) makes it possible to differentiate between the contributions of each power station: typically 1 for nuclear stations, and 0.2 to 0.3 for wind power stations. The peak equation stipulates that total production capacity, counterbalanced by the peak participation coefficients, must be oversized if it is to satisfy demand (for exports, processes and demand technologies), and increased by the chosen level of reserve.

The need for flexibility is linked to the structure of the load curve: installations that run for a relatively long time throughout the year must be installed and actually used. Therefore, to satisfy electricity demand, all functioning electricity systems require, a priori, the installation and effective use of power stations that can run practically all year, as well as of power stations that do not run for more than 200 hours per year. There is a strong link between installation decisions motivated by power dimensioning, and the effective use of these installations for energy supply. Thus, the need for flexibility in time management of electricity systems corresponds to a challenging technical constraint, making it necessary to use more expensive technologies that can rapidly adapt production levels to meet consumption.

These flexibility constraints are on the whole largely ignored in MARKAL models, despite the fact that the requirement for short-term flexibility calls for long-term investments. Indeed, and as the MARKAL approach relies on the minimization of economic criteria [2], which aims to choose an electricity-system that is economically efficient, the least expensive method of production is favored. Ignoring flexibility presents several drawbacks for the MARKAL results in the electricity sector:

- First, it leads to an over-estimation of the importance of stations that have low production costs but low reactivity

on the load curve: this impacts the capacity needs, the type of technologies chosen, and their level of use.

- The system's running costs can be miscalculated since, even with identical technologies, the constraints of operating at partial load increase the costs of meeting with demand (slower amortization, the need to use a greater number of power stations).
- The consequences of the increased share of intermittent renewable sources in the power generation mix are not fully handled. In France, the theoretical potential is estimated at 66 TWh for 30 GW of onshore wind power and 97 TWh for 30 GW of offshore wind power. As development of these reserves increases, there will be a greater need for more flexibility. The feasibility of scenarios figuring a low share of thermal production and a large share of wind or solar power is questionable. On top of that, intermittent sources call for thermal production capacities. As these plants are the only direct sources of greenhouse gas emissions in the electricity sector, they counterbalance the expected potential for reducing emissions attributed to renewables. Thus, this should be revised in order to better assess the level of carbon dioxide emissions.

For all these reasons, flexibility has to be integrated as a constraint within the model's framework.

III. AN AUGMENTED FLEXIBLE MARKAL MODEL

This approach, applied to the French case in [9], where the electricity sector is dominated by nuclear power, quantifies the average production needs for several specific operating modes, such as semi-base load or peak, and then introduces flexibility as one of the model's selection criteria. Technological choices are differentiated for each mode, and the flexibility criterion, defined globally, does not depend on short time divisions for the model's equations. Its quantitative assessment, relies on a time analysis that is both shorter and easier to put into place outside the model. The pre-existent mechanisms that are specific to electricity are conserved. MARKAL's philosophy of linear programming through constraints leads to a natural tendency to be guided by constraints.

The results of this augmented MARKAL model applied to the French electricity system are given for fossil plants (figures 3 and 4), which are power plants that are very sensitive to dynamical features. The two figures compare the actual installed capacities used in the power production process.

The standard MARKAL model installs power stations such as gas or fuel turbines (for the capacity reserve), but hardly ever uses them for electricity production, as shown by the results given in figure 4. Power stations are preferably used over long periods of time and therefore have a base load type profile.

Conversely, the flexible approach illustrated in figure 3 selects, for instance, oil power plants, which are very expensive but essential for responding to peak demand. The augmented MARKAL model makes more plausible the electrical system resulting from the optimization.

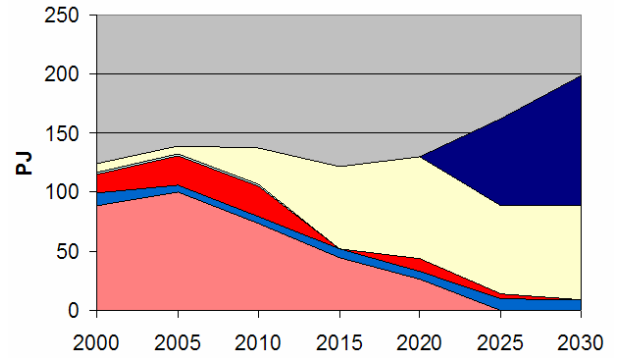


Fig. 3. Fossil plant production 2000-2030: a flexible MARKAL approach



This comparison demonstrates that when flexibility is not properly handled, the results issued from MARKAL reflect a minimal (under-constrained) condition to satisfy global electricity demand. Thus it fails to address properly the questions related to environmental issues, and namely the level of carbon emissions - except for regions where the base load mix is dominated by fossil fuels. This carbon level depends in France on the precision of the thermal production assessment [9].

Regarding these results, flexibility appears to be a key parameter for reaching a better representation of the electricity generation system and consequently achieving sustainable systems. In fact, this issue of flexibility has led to difficulties in forecasting an electric system that translates the need for enough installed capacities in order to both (i) satisfy electric demand and (ii) roughly follow the load curve. Flexibility is a step towards forecast generation shares for which installed capacities are well-anticipated.

Next to this crucial need for flexibility also stands the question of reliability of supply structures. In the following section, we focus on the description of dissipative processes through the network, because losses over the network need to be balanced by greater investments in generation capacities. This second issue on reliability also tackles the dimensioning of the electrical power system, and proposes a complementary path to reach sustainability.

IV. THE CRUCIAL NEED FOR ASSESSING RELIABILITY-INDUCED LOSSES IN THE ELECTRICAL NETWORK

When comparing different technological options that satisfy the same electric demand, one should also assess the quality of the delivered electricity. This is defined by both:

- the continuity of electric power supply, related to the occurrence of power outages, defined as a large-scale disruption in electric power supply;

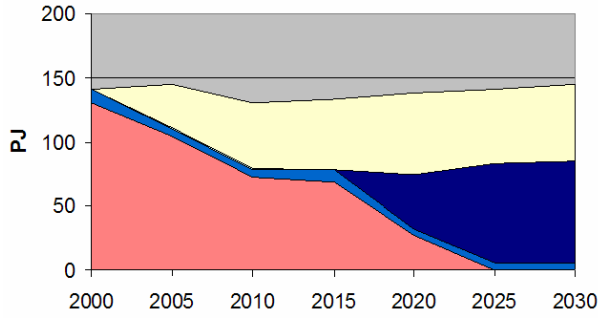


Fig. 4. Fossil plant production 2000-2030: a standard MARKAL approach

- the quality of the delivered electric power, which means that the signal's voltage and frequency must remain between contractual bounding values. When electric power is delivered outside these bounding values, both producing and consuming equipments on the network may fail to perform correctly or disconnect.

Thus, to provide relevant comparisons between future electrical systems, these losses should then be assessed properly, and plausible alternatives must rely on an accurate description of these losses. We define two kinds of dissipative processes on the electrical network: conveyance and reliability losses.

Conveyance losses are losses that occur during power transmission through the network. They mainly depend on whether or not the transmission grid is congested, on the voltage level, or on the network architecture. They can be assessed from the duration of peak, semi-base or base loads. When production capacities are centralized, transmission takes place through longer distances, and conveyance losses may increase, despite high voltage lines. In fact, for a given geographical distribution of loads and generators, the more the meshing of the grid increases, the more the Joule losses decrease, the voltage profile improves and the system becomes more stable. Besides, if the installed generation capacities increase, the power system also has similar benefits.

Conversely, reliability losses are linked to the desired level of reliability. This level depends both on the load of the grid and on the admissible load fluctuation, defined as the maximum loss of generation capacities the electric system must overcome. To face these fluctuations, the system relies on reactive power and kinetic reserve (i.e. automatic adjustments in voltage and frequency) to recover a stable state in the system, before any control action on active power can occur, which would request the spinning reserve. When production capacities are distributed on smaller and less hierarchically organized grids (e.g. decentralized), reactive power and kinetic reserve management is critical to ensure a given reliability level: each grid relies on fewer generation capacities, without counting on capacities from a large-scale system. Reliability losses are related to the dynamic management of the system, but can hardly be compressed if the desired level of reliability remains constant.

To summarize, the balance between these conveyance and reliability losses is highly dependent on energy generation shares and the associated network architecture. In fact these

two kinds of losses take place in the same system and therefore it is difficult to allocate them.

V. TOWARDS A THERMODYNAMIC APPROACH TO THE ELECTRICAL SYSTEM

Basically, thermodynamics assumes that the steady-state of any system is obtained from the maximum-entropy principle, keeping the macroscopic information on the system including the positions of the moving bodies \mathbf{X} , the internal energy U ; and, in the specific context of electromagnetism, the magnetic flux Φ and the electric charge Q squeezed from the earth [8] as shown figure 5.

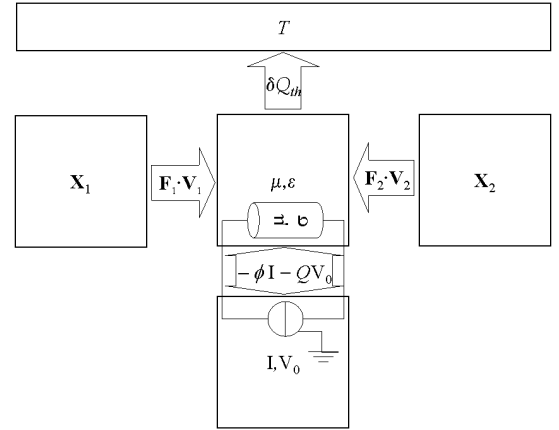


Fig. 5. Chart of the energy exchanges between the various subsystems involved in the thermodynamic framework. While current generators and moving parts can only exchange work with the electromagnetic field (respectively through a current variation and a modification of the boundary conditions on the magnetic moving parts), the thermostat can only receive heat from the other sub-systems.

Besides, thermodynamic assignment should also include an explanation of non-equilibrium conditions and actual processes enforced by some coupling variations, since equilibrium is merely an ideal limiting case of the behavior of matter. Through enforcing an isothermal evolution thanks to the contact of the system with the thermostat at temperature T , two cases - summarized in the *second principle* - may be considered in order to remain coherent with the maximum-entropy principle checked by any isolated system. First, the evolution does not modify the entropy of the isolated system [11]. Such an evolution is said to be *reversible* and involves only *work* exchanges, through sufficiently smooth variations of the energy couplings, namely:

- the mechanical power exchanged between the actuators $P_{\text{mech}} = \sum \mathbf{F} \cdot \mathbf{V}$ where $\mathbf{V} = \frac{d\mathbf{X}}{dt}$ is the velocity of the moving body \mathbf{X} (e.g. the rotor) experiencing the external force \mathbf{F} ; and, in the specific context of electromagnetism,
- the electromagnetic coupling variation $\frac{d(\Phi I + QV_0)}{dt}$ where I is the net current exciting the electromagnetic field (e.g. the excitation in a synchronous machine), and V_0 the earth voltage.

On the other hand, the evolution increases the entropy of the isolated system, so that some amount of work exchanged

between actuators is lowered in heat during the process: such an evolution is said to be *irreversible*.

Despite some improvements summarized in [3] for the steady state regime, thermodynamic approaches to electromagnetism do not consider any extensions toward time-varying regimes. In the following, a thermodynamic interpretation of Faraday's Law within the quasi-static approximation is given, giving physical sense to the former variational presentation [6].

The *first principle* conveys energy conservation and reads

$$\frac{dU}{dt} = P_{\text{mech}} - T \frac{dS_{\text{th}}}{dt}$$

Hence the irreversibility experienced by the system coupled with its thermostat may be discussed from the Helmholtz free-energy $F = U - TS$ by expressing

$$P_{\text{mech}} - \frac{dF}{dt} = T \left(\frac{dS}{dt} + \frac{dS_{\text{th}}}{dt} \right) \quad (1)$$

where the RHS matches the power lowered in heat by the whole system, commonly known as the Joule losses P_{Joule} . According to the *second principle*, this term is always positive and the lower the Joule losses, the more reversible the evolution. In order to take explicitly into account the inertial behavior of the electromagnetic coupling (Lenz law), it is convenient to introduce the so-called Gibbs free-energy $G = F - \Phi I - QV_0$ on which another reversible assignment may be expressed

$$P_{\text{mech}} - \frac{dG}{dt} = \min \left(P_{\text{Joule}} + \frac{d(\Phi I)}{dt} + \frac{d(QV_0)}{dt} \right) \quad (2)$$

As a matter of fact, Faraday's Law is achieved by enforcing the condition of reversibility expressed from the Gibbs free-energy (2), whereas the condition obtained from the Helmholtz free-energy (1) restores only the direct current flow behavior and underestimates actual losses [10]. This reversible interpretation of Faraday's Law gives new insights and raises issues on improving the energy efficiency of the electrical system as a whole, and is very promising for further investigations:

- Globally, expressing the reversibility condition (2) over the electromagnetic energy coupling variations prevents tremendous Joule losses and therefore mitigates any load fluctuation. This striking property offers a way of recovering the stability of the network by delaying and softening the impact of the fluctuation.
- Locally, the reversibility condition (2) addresses a multi-scale description from the very deep structure of material to the network. While the former allows to aggregate properly the losses over the system, the latter provides the electrical power density as the local variation between the LHS and the RHS in (2). Hence, a decentralized network favors smooth electrical power density whereas a centralized network exhibits a rough profile.

To summarize, the equilibrium condition in (2) provides a true optimization of the power transaction between producers and consumers on the electric system, for a set of state variables. The best transaction results from a compromise

between the minimization of (i) the Joule losses and (ii) the variation of electromagnetic coupling energy. (The variation of the electrostatic term QV_0 in (2) is negligible when studying the whole electricity network.) Acting as a stock in this description, the electromagnetic coupling energy is related to reactive power and subsequent reliability. This coupling energy enables electromechanical conversion and transmission throughout the network and ensures network reliability, but requires maintaining the excitation current in compensation.

VI. CONCLUSION

In order to assess a sustainable power generation system, space and time constraints have to be considered.

On the one hand, flexible features of electricity are handled using an improved version of the MARKAL model.

On the other hand, the thermodynamic approach applied to the transmission power system leads to a suitable description of losses related to reactive power and kinetic reserve management to ensure network reliability. Thanks to (2), the network can be studied as a one-loop system, as far as one has access to the state variables that characterize this system and its evolution. This one-loop description comes down to a schematic network gathering the properties of the whole electric system. Two relaxation time constants are exhibited when applying both (2) and the mechanical energy conservation equation. They are, by order of magnitude, related to the variation with time of the reactive power and of the kinetic reserve. To ensure the stability of the system, they should both occur before the automatic adjustments and the spinning reserve. With knowledge of the load of the system, these relaxation time constants are respectively bound by the admissible variations of voltage and frequency, under normative load fluctuations (i.e. the level of reliability). Basically, these constants are related to the amount of electrical steel, rotating mass, inductive components on the network and the excitation of generators.

These results, added to the level of conveyance losses, explicitly depend on the shares of electricity generation. The implementation of these results in a long-term planning model such as MARKAL is in progress.

REFERENCES

- [1] Assoumou E, Bordier M, Guerassimoff G, Grange C, Maïzi N. La famille MARKAL de modèles de planification énergétique : un complément aux exercices de modélisation dans le contexte français. *Revue de l'Energie* 2004; Juillet/Aout 2004, 357-367.
- [2] Berger C, Dubois R, Haurie A, Lessard E, Loulou R, Waaub J.-P. Canadian MARKAL: An advanced linear programming system for energy and environmental modeling. *INFOR* 1992; vol.303;3.
- [3] Christen T, "Application of the maximum entropy production principle to electrical system," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 39, pp. 4497-4503, 2006.
- [4] Fishbone L.G, Abilock H. MARKAL, a linear programming model for energy systems analysis: technical description of the BNL version. *International journal of Energy research* 1981;vol. 5, 353-375.
- [5] Gibowski C., Les atouts de la conversion électromécanique et électromagnétique pour l'optimisation de l'efficacité énergétique. *Mastère OSE, Schneider Electric/ADEME/Ecole des Mines de Paris* 2005.
- [6] Hammond P, "Energy methods in electromagnetism ". New York, USA: Clarendon, Oxford University Press, 1981.
- [7] Ilic M, "From hierarchical to open access electric power systems", *Proceedings IEEE*, vol. 95, No 5, pp. 1060-1084, 2007.
- [8] Jaynes E, *Physical Review*, vol. 106, pp. 620-630, 1957.
- [9] Maïzi N, Assoumou E, Bordier M, Guerassimoff, Mazauric V. Key features of the electricity production sector through long-term planning: the French case. *Power Systems Conference and Expo*, October 29 - November 1, Atlanta, 2006.
- [10] Mazauric V, "From thermostatics to Maxwell's equations: A variational approach of electromagnetism". *IEEE Transactions on Magnetics* 2004; vol.40; 947-948.
- [11] Shannon C. E, "A mathematical theory of communication," *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379-423, 1948.
- [12] *Annual Energy Review 2007*. Report No. DOE/EIA-0384(2007), Energy Information Administration, Department of Energy, 2007.
- [13] ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme) web site: <http://www.etsap.org>
- [14] *Bilan prévisionnel 2006-2015. Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité* 2002.
- [15] *System for the Analysis of Global Energy Market, Model Documentation, Volume 1*. Energy Information Administration, US Department of Energy 2003.
- [16] *World Energy Investment Outlook 2003, World Energy Outlook, Vol. 11*, Organisation for Economic CO-opération and Development. International Energy Agency, Paris, France, 2003.

Article [53] relatif au chapitre 4

prospective et vecteur électrique

OPTIMALITY PRINCIPLES FOR THE SUSTAINABILITY OF ELECTRICAL SYSTEMS: A THERMODYNAMIC APPROACH

Vincent Mazauric¹ and Nadia Maïzi²

1 Schneider Electric, Strategy & Innovation, 38TEC, 38050 – Grenoble cedex 9, France
vincent.mazauric@schneider-electric.com

2 Centre for Applied Mathematics, MINES ParisTech, BP 207, 06902 – Sophia Antipolis, France
nadia.maizi@mines-paristech.fr

ABSTRACT

At first sight, aiming for energy efficiency appears to penalize electricity carriers. A close look at electrical energy flow, from primary to final energy, reveals abysmally low efficiency, resulting from the generation mix, transmission and distribution losses, and obsolete equipment. As a consequence, the share of primary electricity has to be reduced in order to achieve low carbon society scenarios in line with energy saving policies.

Since it relies on a partial description of the electrical workflow, this viewpoint reveals certain weaknesses that need to be qualified with a long-term planning assessment. We propose circumventing this drawback using a thermodynamic analysis based on the Gibbs free energy of the electromagnetic field. In particular, the so-called Maxwell-Faraday law of induction is the local result of an optimal path towards reversibility of the entire power system, described as a monotherm engine. This approach supports a multi-scale analysis that naturally addresses those levels that involve huge losses, namely the functional materials, conversion devices and transmission network.

As a result, the role played by magnetic energy is clarified: although it is required locally for conversion purposes, magnetic energy's overall value governs the transmission of electrical power through the grid. In addition to indicating kinetic reserve, an evaluation of the power system's reliability should include an assessment of magnetic energy from the very first moment of fluctuation (typically a few *ms*).

Keywords: variational principles, thermodynamics, electromagnetic field, energy conversion, power systems, long term planning.

1. INTRODUCTION

Electricity is a very convenient way to deliver a huge amount of power to a dense area of demand. The predicted population densification means that electricity consumption will significantly increase over the coming

decades. Future investments in the electricity sector during the next three decades are estimated at about US\$ 10 Trillion [1], which is equivalent to 2/3 of total worldwide energy investment needs, involving all areas of the energy-supply chain, and is three times higher in real terms than investments made in the electricity sector over the past three decades.

Significant growth of the electricity sector is mainly based on the following assumptions: increased domestic energy demand in emerging countries, and the refurbishment of ageing facilities in developing countries. Moreover, the move to electricity is expected to promote technologies with lower environmental impacts in order to combat global warming due to greenhouse gas emissions and counterbalance fossil energy depletion.

While most scenarios on the future of the electricity sector assess a mix through available primary energy sources (hydro, nuclear, renewable, fossil, etc.), they usually neglect the actual energy efficiency of the electrical supply chain as a whole.

Indeed, electrical energy is severely disadvantaged by the efficiency of the Carnot cycle, transmission losses and the low performance of applications. If we analyze the chain linking the producer to the consumer in the conversion of the primary energy source to the final (commercial) energy supply, shown in figure 1, we find that electricity drains 3,767MToE of the primary energy source from a total of 10,376MToE for all fuels, to convert only 1,139MToE into final electricity. Further transformation of final energy into useful energy (the energy actually needed in line with available technologies) provides the overall "efficiency" of the "all-fuel" energy chain at around 37%, whereas it only reaches 27% in the specific case of electricity [3].

Moreover, this abysmal lack of efficiency may be exacerbated by the fact that the electrical power system is far from optimized, as illustrated by the electrical losses in the USA given in figure 2: for both sectors represented, the level of losses induced by electrical generation follows a rise in electricity demand.

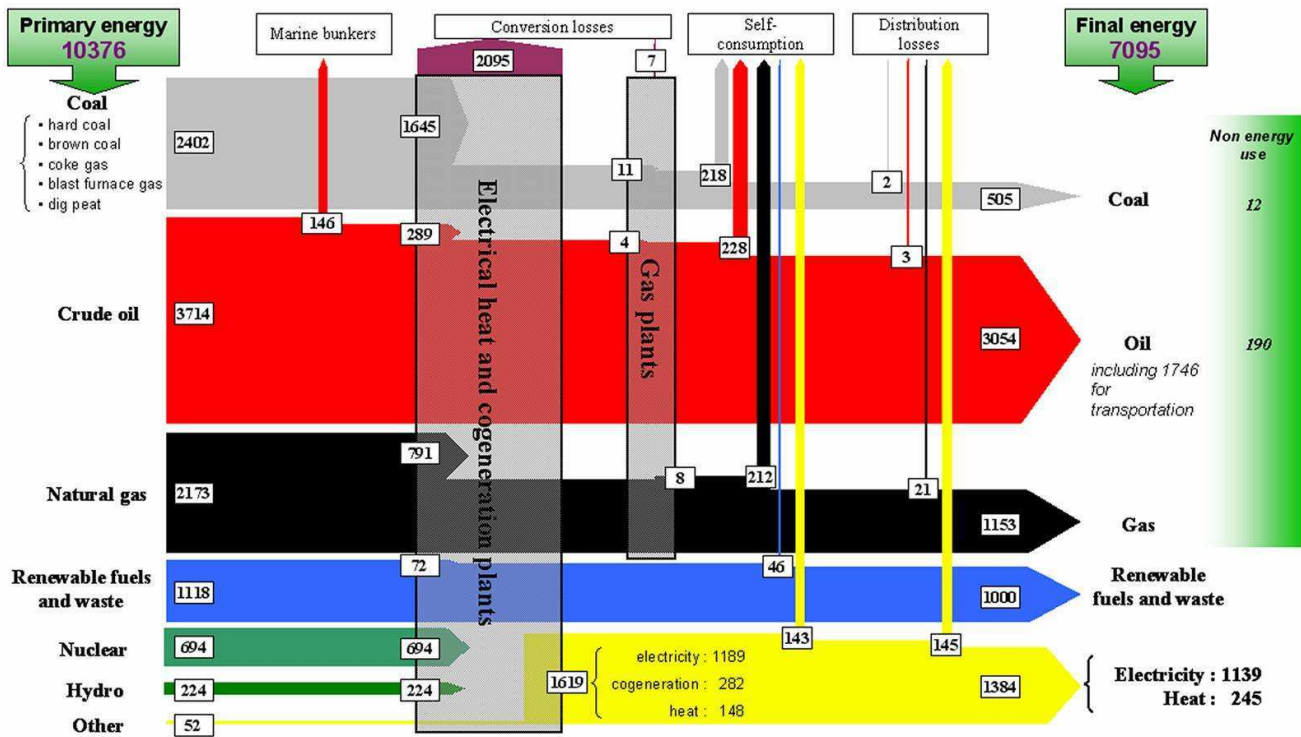


Figure 1 Energy supply chain (compiled from [2]).

Ultimately, electricity generation contributes 40% of global CO₂ emissions, before deforestation and transportation [5].

This could infer that state-of-the-art of electrical engineering does not allow energy efficiency of the whole electrical supply chain to be achieved.

In contrast, this paper provides an energy-efficient description of electromagnetism based on a reversible interpretation of Faraday's Law, first within a global description of the electrical system (see Sect. 2) then through a local focus (see Sect. 3). This type of physics-oriented framework appears suitable for the consolidation (i) in space, of all scales involved in the conversion process of the electromagnetic energy; (ii) in time, over the whole life-cycle of the electrical supply chain.

Section 3 explains how the latter, related to network management, facilitates a comprehensive and synthetic description of the power transmission grid. Lastly, the interplay between energy-efficient issues should be discussed within a long-term planning exercise dedicated to sustainable development of power systems (see Sect. 4).

Since electricity phenomena are derived through electromagnetism laws, we propose taking a variational approach leading from thermostatics to Maxwell's equation [6].

2. VARIATIONAL PRINCIPLES IN ELECTROMAGNETISM

To circumvent the impossibility of providing any deterministic evolution, thermodynamics assume that the steady-state of any system in contact with a thermostat is obtained from the maximum-entropy principle keeping the macroscopic information on the system including (see [7,8] and Appendix A):

- the angular positions of the moving bodies Θ ;
- the internal energy E ; and, in the specific context of electromagnetism
- the magnetic flux ϕ ;
- the electric charge Q extracted from the earth.

An equivalent description of any electrical system starts with the energy couplings, respectively (figure 3):

- the mechanical work exchanged with the actuators;
- the heat exchanged with the thermostat at temperature T ;
- a magnetic term (ϕI) where the magnetic flux ϕ is created by the electrical current I exciting the generator;
- an electrostatic term (QV_0) where V_0 is the earth voltage.

and introduces the Gibbs potential as a functional of the state variables of the electrical system, respectively temperature T , the net currents provided by the generators I and the earth voltage V_0 . Its minimum provides the Gibbs free-energy of the system $G(T, I, V_0, \Theta)$ [9].

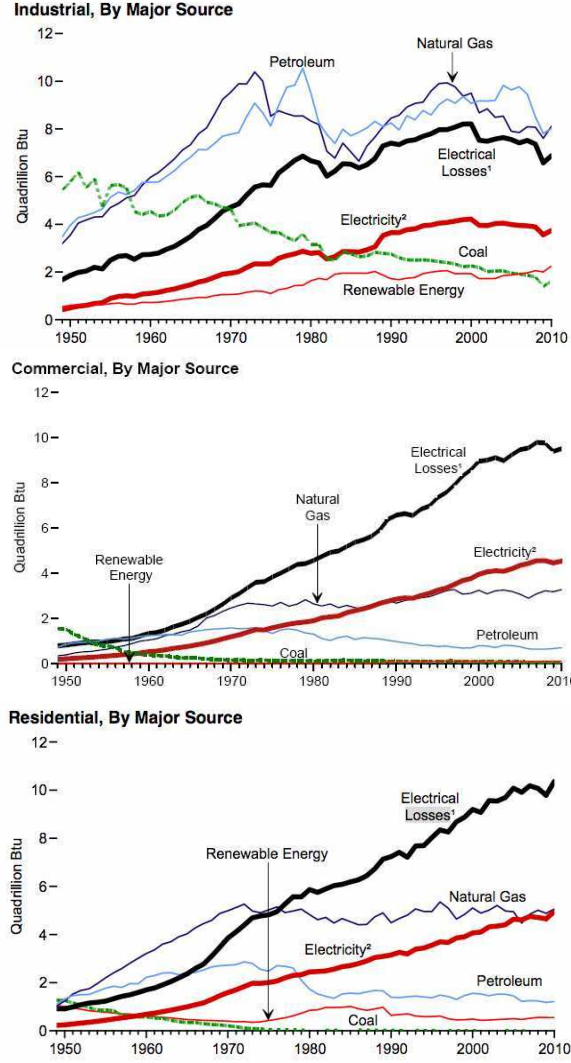


Figure 2 US industrial (up), commercial (middle) and residential (down) total energy consumption, Major sources, from 1950 to 2010 [4]: Electricity use (and related losses) expanded dramatically.

The statistical assignment also includes an explanation of the non-equilibrium conditions and irreversible processes, since equilibrium is merely an ideal-limiting case of the behavior of matter. In order to remain coherent with the maximum-entropy principle checked by an isolated system, two cases may be considered:

1. the evolution does not modify the entropy $S + S_{th}$ of the isolated system. Such an evolution is said to be reversible and involves mainly work exchanges, through sufficiently smooth variations in the energy couplings, namely:
 - the mechanical power exchanged between actuators $P_{mech} = \sum C \cdot \dot{\Theta}$ where $\dot{\Theta} = \frac{d\Theta}{dt}$ is the angular velocity of the shaft experiencing the external torque C ; and in the context of electromagnetism
 - the electromagnetic coupling $\frac{d(\phi I + Q V_0)}{dt}$;

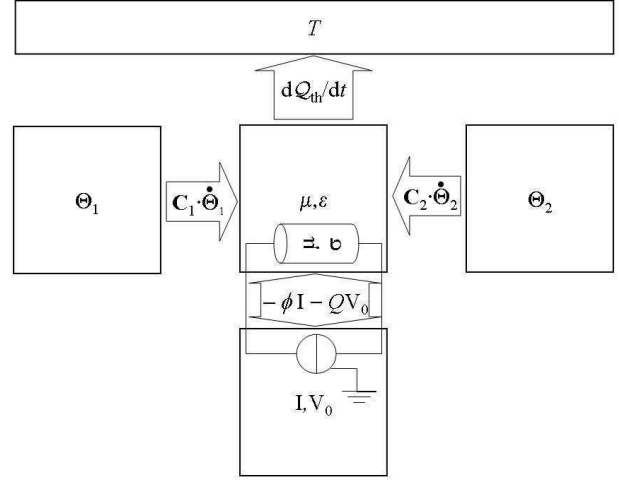


Figure 3 Chart of energy exchanges between the various subsystems involved in the thermodynamic framework. (μ, σ) and (μ, ε) denote respectively the behavior laws of conductors region C and dielectrics region D soaked with the electromagnetic field. While current generators and moving parts can only exchange work with the electromagnetic field (respectively through current variation and a modification of the boundary conditions on the moving parts), the thermostat, at temperature T , can only receive heat from the other sub-systems.

2. the evolution increases the entropy of the isolated system so that some of the work exchanged between actuators is dissipated in heat during the process: such an evolution is said to be irreversible.

The first principle conveys the energy conservation and reads¹:

$$\frac{dE}{dt} + \frac{dE_{kin}}{dt} = P_{mech} - T \frac{dS_{th}}{dt} \quad (1)$$

where $T \frac{dS_{th}}{dt}$ denotes the heat produced by the field, i.e. received by the thermostat, and E_{kin} is the kinetic energy embedded within the whole system (e.g. in the rotor of the electrical machines).

Hence, the irreversibility experienced by the system coupled with its thermostat may be inferred from the Helmholtz free-energy (called electromagnetic energy in the context of electrical engineering):

$$F = E - T S \quad (2)$$

by expressing:

$$P_{mech} - \frac{dE_{kin}}{dt} - \frac{dF}{dt} = T \left(\frac{dS}{dt} + \frac{dS_{th}}{dt} \right) \quad (3)$$

where the right-hand side matches the power dissipated in heat by the whole system, commonly known as Joule losses P_{Joule} . According to the second principle, this term is always positive, and the lower the Joule losses, the more reversible the evolution. In order to explicitly take into account the inertial behavior of the electromagnetic

¹In this work we generally use *italics* to denote variational parameters or functionals and roman type to specify their minimum values.

coupling (Lenz' Law), it is convenient to use the Gibbs free-energy:

$$G = F - \phi I - Q V_0 \quad (4)$$

on which another reversible assignment may be expressed:

$$P_{\text{mech}} - \frac{dE_{\text{kin}}}{dt} - \frac{dG}{dt} = \min \left(P_{\text{Joule}} + \frac{d(\phi I)}{dt} + \frac{d(Q V_0)}{dt} \right) \quad (5)$$

Within the quasi-static approximation, Faraday's Law of induction is achieved by forcing the condition of reversibility expressed by the Gibbs free energy, whereas the condition obtained from the Helmholtz free energy only restores the flow behavior of the direct current (see Appendix B).

Unfortunately, design and power management often take the latter approach which results in:

- an underestimation of the losses in all cases; and
- an unsuitable description of the relaxation mechanisms involved in power dynamics.

This state of the art jeopardizes the expected performances of the system, from deep within the material to the dynamic properties of the network. The following section aims to reconcile the reversibility requirement (5) at different scales in order to achieve energy efficiency and reliability in power systems.

3. FROM FIELD DESCRIPTION TO POWER MANAGEMENT

Thanks to a spatial spectral decomposition performed on the whole system [10], the basis of the current density consists in a superposition of well-split contributions from the atomic scales to the power network scales [11,12]. Assuming a mean-field hypothesis which consists in performing independent minimizations (5) for each mode, a consistent "coarse-graining" procedure is done by enforcing the conservation of the macroscopic information on the system between low- and high-spatial frequencies. By adopting a field description to restore – in an unbound way – the span of the electromagnetic coupling, this procedure brings valuable insight on the scale at which thermodynamic derivation is performed (see appendix B):

- As the state function of the system, Gibbs free energy G is unique. It follows that the magnetic flux density is divergence-free and that the voltage V_0 belongs to a potential map. Hence the maximum entropy principle provides locally positive static dielectric and magnetic behavior laws [6];
- At the device scale, the quasi-static approximation assumes only static averaged-charge density in the conductors, and this in fact turns out to be nil so as to respect the invariance of Joule losses under Galilean transformations. Thus, only free currents carried by conductors may yield heat losses. Assuming an even dependence of the Joule losses with the current density in conductors to prescribe invariance of the Joule losses with the inversion of time, some tedious variational calculations on (appendix B.1) yield the Maxwell-Faraday equation (appendix B.9) and restore the Ohm's law with

motion (appendix B.8). This approach addresses a deeper justification of the Finite Element Method which consists in building an approximation of the variational formulation (appendix B.1) but with a finite number of degrees of freedom chosen on a mesh [13,14];

- So far the electrical network has been considered within a global description. Nevertheless, for a local focus on design and/or power management, it is convenient to introduce the electrical power P_{elec} (appendix B.12) from the local power deviation in the domain Ω exhibited between the LHS and the RHS in (5) so that the contribution of Ω to (5) reads:

$$P_{\text{mech}}(\Omega) - \frac{dE_{\text{kin}}(\Omega)}{dt} + P_{\text{elec}}(\Omega) - \frac{dG(\Omega)}{dt} \quad (6)$$

Hence, the electrical power balance on the network:

$$\sum_{\Omega} P_{\text{elec}}(\Omega) = 0 \quad (7)$$

locally enforces the conservation equation:

$$P_{\text{mech}}(\Omega) + P_{\text{elec}}(\Omega) = P_{\text{Joule}}(\Omega) + \frac{dF(\Omega)}{dt} + \frac{dE_{\text{kin}}(\Omega)}{dt} \quad (8)$$

known as the integral form of the Poynting's equation.

Overall, the power dynamics experienced by the power network – the variation of the electrostatic term ($Q V_0$) is negligible when studying the whole electricity network – follows:

$$P_{\text{mech}} = P_{\text{Joule}} + \frac{dF_m}{dt} + \frac{dE_{\text{kin}}}{dt} \quad (9)$$

This formulation is extremely important as it indicates the contributions of energy flows exchanged in order to realize the electricity grid balance in real-time. Indeed, while the network faces a transient in consumption or generation, its dynamics follow the power balance expressed in equation (9) where:

- the role of the dynamic reserves in magnetic energy F_m (also known as reactive energy) and kinetic energy E_{kin} is highlighted to attenuate the fluctuation, and during which
- the magnetic coupling ($F_m - G_m$) has to remain at a high enough (mandatory positive) level to avoid any loss in the induction process (appendix C.9) and subsequent "black-out" in the transmission, according to (5).

As matter of fact, the magnetic energy enables electromechanical conversion and transmission throughout the network and ensures network stability, but it requires maintaining the excitation current in compensation. The latter is illustrated in figure 4:

- At $t = 10s$, the network undergoes a 10% rise in electrical power consumption P_{elec} (by adjustment of R_{load}). According to the relaxation time constants (appendix C.3,4 and Table 1), the magnetic energy F_m is immediately cut whereas the kinetic energy E_{kin} undergoes a slow relaxation.

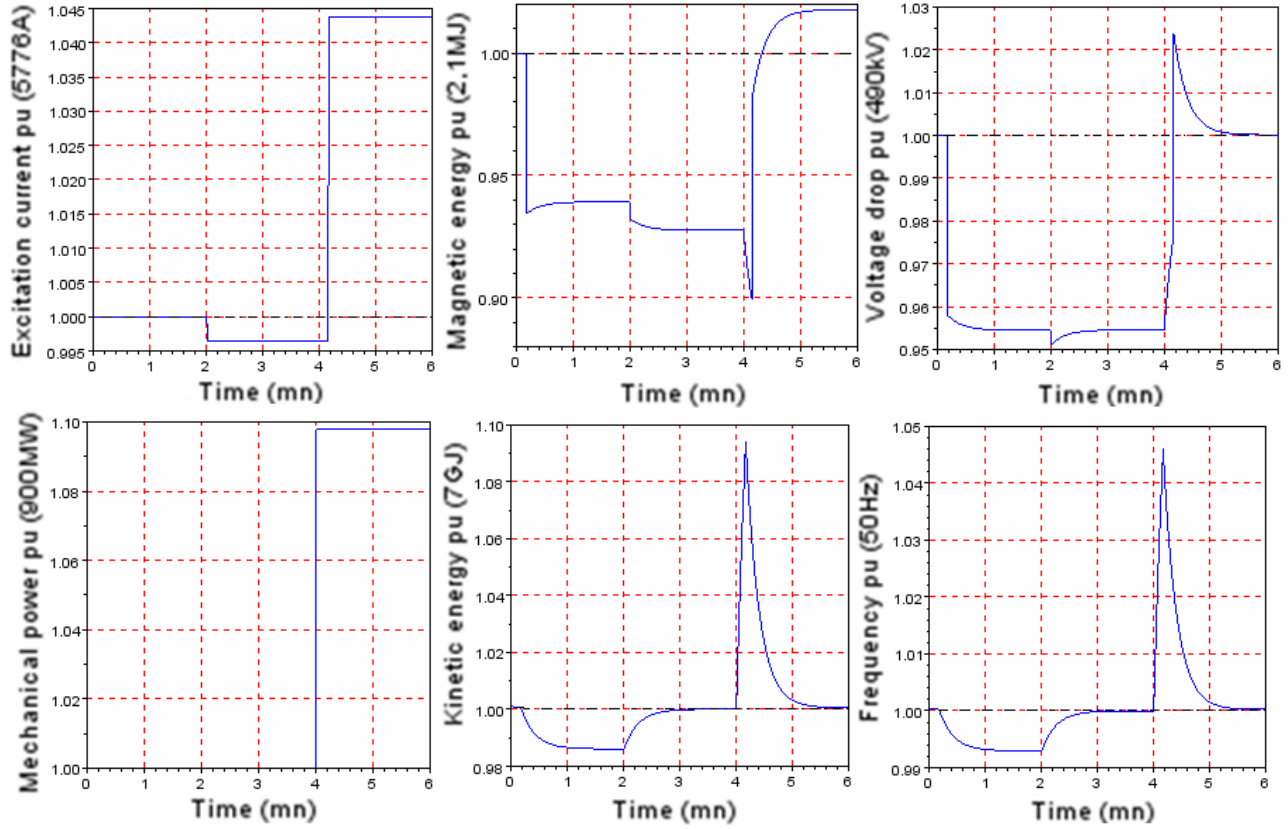


Figure 4 Behavior of the kinetic and magnetic reserves under fluctuation and control. Calculations are made thanks to a time-stepping integration of (appendix C.1) with a resolution of the phasor diagram (appendix C.2) at each time step. The rated values refer to appendix C Table 1.

- At $t = 2\text{mn}$, the rotor current I is adapted to restore the rated frequency, leading to new damage to the magnetic energy F_m .
- At $t = 4\text{mn}$, the mechanical power P_{mech} is increased to restore the rated-terminal voltage U . To avoid very extensive dissipation of the magnetic energy F_m and rotor racing, the excitation current I is finally updated at $t = 4\text{mn}10\text{s}$ to restore a new set-point with rated frequency and terminal voltage.

Thus equation (9) emphasizes the critical roles played by the magnetic and kinetic energies along with the spinning reserve in monitoring load fluctuation: in order to maintain appropriate variations of frequency and voltage, a sufficient level of magnetic and kinetic energies and spinning reserve is required in the system.

Further analysis of the different time scales associated with the different terms of equation (9) make it possible to recover the three control levels involved in network operations. The dynamic management of a sudden imbalance is achieved within a time period that can range from:

- several milliseconds (dF_m/dt) and seconds (dE_{kin}/dt), which refer to primary control of the grid. This control re-establishes the balance between demand and generation at a system frequency other than the frequency set-point value (50 Hz). It causes a

deviation in power exchanges between control areas from the scheduled values. The voltage regulators of generating units implement primary voltage control. These regulators initiate a variation in generator excitation, and magnetic energy is adjusted using automatic devices with a time response of less than a few seconds.

- up to several minutes (P_{mech}), which refer to secondary or tertiary control of the grid. While the function of the secondary control is to restore the system frequency and voltage to their rated-values, the tertiary control aims at an economically efficient set point with respect to power exchanges between the control areas. Secondary and tertiary use either automatic control devices within a given zone of voltage control, or rely on the Transmission System Operator's manual action to activate compensation equipment.

Network management of this kind makes it possible to achieve a system that is both adequate (i.e. ability to satisfy aggregate electrical demand and energy requirements of customers at all times) and secure (i.e. ability to withstand sudden disturbances such as the unanticipated loss of system elements).

4. CONCLUSION

The reversible interpretation of Faraday's Law provides new insight and challenges for improving the energy efficiency of the electrical system as a whole and is highly promising for further investigations [15]. It suggests that knowledge of the state of the reserves as described by equation (9) will be useful when comparing different technological options that satisfy the same electric demand. This is extremely relevant for assessing future electrical power systems.

Indeed, models for energy planning have proven useful in determining the energy sector's plausible evolution in the mid- and long-term in the face of strong environmental pressures, such as carbon mitigation or fossil energy depletion. Issues, such as pointing out the main drivers of the energy system at a given regional scale, anticipating changes and impacts of energy prices, and estimating pollutant emissions, require models of substitution possibilities through the whole energy chain [16,17]. For instance the MARKAL (MARKet ALlocation) type of technology-rich models provide a partial solution to this problem [18-20]. However, in order to assess the sustainability and robustness of these energy planning model results, it is necessary to provide a suitable description of electricity generation systems' time and space constraints. Namely, one should also assess:

- the continuity of electric power supply, related to the occurrence of power outages, defined as large-scale disruption in electric power supply;
- the quality of the electric power delivered, which means that voltage and frequency of the signal must remain between contractual bounding values. When electric power is delivered outside these bounding values, both producing and consuming equipments on the network may fail to perform correctly or disconnect.

Thus, to provide relevant comparisons between future electrical systems, we propose to make a proper assessment of the reserves involved in equation (9), in order to select the most relevant power system from between different alternatives. This analysis will ensure that electricity production modes are chosen for their dynamic nature to ensure the power balance [21].

ACKNOWLEDGEMENT

We would like to thank Dr. Mathilde Drouineau from Mines ParisTech and Mr. Cong Martin Wu from Schneider Electric for very fruitful discussions.

This research was partially supported by the Chair Modeling for sustainable development, driven by MINES ParisTech, Ecole des Ponts ParisTech, AgroParisTech, and ParisTech, supported by ADEME, EDF, RENAULT, SCHNEIDER ELECTRIC and TOTAL (<http://www.modelisation-prospective.org/>).

REFERENCES

- [1] World Energy Investment Outlook 2003. Paris, France: Organisation for Economic Co-operation and Development/International Energy Agency, 2003.
- [2] Key world energy statistics from the IEA. Paris, France: Organisation for Economic Co-operation and Development/International Energy Agency, 2004.
- [3] Gibowski C. Les atouts de la conversion électromagnétique et électromécanique pour l'optimisation de l'efficacité énergétique. Optimisation des Systèmes Energétiques. Sophia Antipolis, France: Ecole des Mines de Paris, 2005.
- [4] Annual Energy Review 2010. Washington DC, USA: Energy Information Administration, Department of Energy, 2011.
- [5] Rogner H-H. Nuclear power and climate change (invited). United Nations Framework Convention on Climate Change Conference (COP-12). Nairobi, Kenya, 2006.
- [6] Mazauric V. From thermostatics to Maxwell's equations: A variational approach of electromagnetism. IEEE Transactions on Magnetics 2004;40 (2):945-8.
- [7] Jaynes ET. Information theory and statistical mechanics. Physical Review 1957;106 (4):620-30.
- [8] Garrett AJM. Macroirreversibility and Microreversibility reconciled: The second law. In: Buck B, Macaulay VA, editors. Maximum entropy in action. Oxford, UK: Oxford University Press, 1991. pp. 139-70.
- [9] Morita T. Formal structure of the cluster variation method. Progress in theoretical physics 1994;115:27-39.
- [10] Russakoff G. A derivation of the macroscopic Maxwell equations. American Journal of Physics 1970;38 (10):1188-95.
- [11] Mazauric V, Maloberti O, Meunier G, Kedous-Lebouc A, Geoffroy O, Rebière Y. An energy-based model for dynamic hysteresis. IEEE Transactions on Magnetics 2005;41 (10):3766-8.
- [12] Mazauric V, Drouineau M, Rondot L. Assessing anomalous losses with dynamic hysteresis models. International Journal in Applied Electromagnetics and Mechanics 2010;33 (1):95-101.
- [13] Chari MVK, Salon SJ. Numerical Methods in Electromagnetism. San Diego: Academic Press, 2000.
- [14] Rondot L, Mazauric V, Wendling P. An energy-compliant magnetodynamic error criterion for eddy-current calculations. IEEE Transactions on Magnetics 2010;46:2353-6.
- [15] Maïzi N, Drouineau M, Mazauric V. Procédé d'estimation de la stabilité d'un système électrique (Schneider Electric Industries SAS/ARMINES). France: Institut National de la Propriété Industrielle. 2011, Patent FR 11 61087.
- [16] Maïzi N, Assoumou E, Bordier M, Mazauric V. Key features of the electricity production sector through long-term planning: The french case. IEEE PES Power Systems Conference and Exhibition. Atlanta, GA, USA, 2006. pp. 54.

- [17] Selosse S, Assoumou E, Maïzi N, Mazauric V. Post-Kyoto policy implications on the energy system: A TIAM-FR long term planning exercise. 22nd World Energy Congress. Montreal, Canada, 2010.
- [18] <http://www.etsap.org/>. Energy Technology Systems Analysis Programme.
- [19] Fishbone LG, Abilock H. MARKAL, a linear programming model for energy systems analysis: Technical description of the BNL version. International Journal of Energy Research 1981;5:353-75.
- [20] Assoumou E, Bordier M, Guerassimoff G, Grange C, Maïzi N. La famille MARKAL de modèles de planification énergétique: Un complément aux exercices de modélisation dans le contexte français. Revue de l'énergie 2004;558:357-67.
- [21] Drouineau M, Maïzi N, Assoumou E, Mazauric V. A TIMES model of the Reunion Island for analysing the reliability of electricity supply. International Energy Workshop. Stanford, CA, USA, 2011.
- [22] Shannon CE. A mathematical theory of communication. The Bell System Technical Journal 1948;27:379-423.
- [23] Landau LD, Lifschitz EM. Electrodynamics of continuous media. New York, NY, USA: Pergamon, 1960.
- [24] Christen T. Application of the maximum entropy production principle to electrical system. Journal of Physics D: Applied Physics 2006;39:4497-503.
- [25] Mazauric V. Des principes thermodynamiques aux équations de Maxwell: Une approche variationnelle de l'électromagnétisme. In: Meunier G, editor. Champs et équations en électromagnétisme. Paris, France: Hermès, 2003. pp. 147-262.
- [26] Hammond P. Energy methods in electromagnetism. New York, USA: Clarendon, Oxford University Press, 1981.
- [27] Le-Bellac M, Lévy-Leblond J-M. Galilean electromagnetism. Il Nuovo Cimento 1973;14B (2):217-33.
- [28] Park RH. Two Reaction theory of synchronous machines. AIEE Transactions 1929;48:716-30.

APPENDICES

1. Thermostatistics

To circumvent the impossibility of providing any degree of deterministic evolution of a complex system, a statistical description is adopted. Given the probability distribution \tilde{p} , the lack of information on the system is given by the Shannon entropy [22]:

$$\tilde{S} = S(\tilde{p}) = -k \sum_i \tilde{p}(x_i) \ln \tilde{p}(x_i) \quad k > 0 \quad (\text{A.1})$$

where $\{x_i\}_i$ describes the set of configurations assumed by the system.

The system's only unbiased uncertainty assignment consists in maximizing its entropy with respect to the macroscopic knowledge [7]. In other words, to use any other assignment would amount to an arbitrary assumption of information which, by hypothesis, we do not have.

Hence, for each macroscopic expected value \tilde{A}_r of the random value A_r :

$$\tilde{A}_r = \sum_i \tilde{p}(x_i) A_r(x_i) \quad (\text{A.2})$$

the Lagrangian multipliers $\{\lambda_r\}_r$ are introduced to form the partition function:

$$Z(\lambda_1, \dots, \lambda_r, \dots) = \sum_i \exp\left(-\sum_r \lambda_r A_r(x_i)\right) \quad (\text{A.3})$$

Then, the so-called Boltzmann-Gibbs' statistic law p gives the maximum-entropy probability with respect to the macroscopic averages (A.2):

$$p(x_i) = \frac{\exp\left(-\sum_r \lambda_r A_r(x_i)\right)}{Z(\lambda_1, \dots, \lambda_r, \dots)} \quad (\text{A.4})$$

Furthermore, the values of the Lagrangian multipliers λ_r completely define the statistic law (A.4). The entropy of the system at the steady state $S(p)$ (denoted by S) follows:

$$\tilde{S} \leq S = k \left(\ln Z + \sum_r \lambda_r A_r \right) \quad (\text{A.5})$$

where A_r denotes the average provided by the maximum-entropy probability (A.4):

$$A_r = \sum_i p(x_i) A_r(x_i) \quad (\text{A.6})$$

It follows from (3) that:

$$A_r = -\frac{\partial \ln Z}{\partial \lambda_r} \quad (\text{A.7})$$

Given this framework, the thermostatic laws are restored by considering that the steady state of any physical system is at least known by its energy average, commonly called its internal energy and denoted E . Introducing the Hamiltonian \mathcal{H} of the system [8], E is given by:

$$E = \sum_i p(x_i) \mathcal{H}(x_i) \quad (\text{A.8})$$

The related Lagrangian multiplier defines temperature T through the relation:

$$\lambda_1 = \frac{1}{kT} \quad (\text{A.9})$$

where k is the so-called Boltzmann's constant. To ensure the convergence of (A.3), note that temperature T is always positive if the energy levels are positively unbounded. Hence, the other macroscopic averages are defined through a set of (chemical) potentials:

$$\alpha_r = -(kT)\lambda_r \quad (\text{A.10})$$

so that the inequality (A.5) may be replaced by:

$$\tilde{E} - \sum_{r \geq 2} \alpha_r \tilde{A}_r - T \tilde{S} \geq -kT \ln Z = G(T, \dots, \alpha_r, \dots) \quad (\text{A.11})$$

($T, \dots, \alpha_r, \dots$) are also known as the system state variables.

The left-hand side of (A.11) defines the Gibbs' potential as a functional on the set of probability distributions \tilde{p} . Its minimum, obtained for the Boltzmann's-Gibbs statistic law, provides the state function of the system: the so-called Gibbs' free energy G . Thus, the steady state may be viewed as a competition between (see figure 3 in the context of electromagnetism):

- an ordered energy due to the internal interactions of the system \tilde{E} and couplings $-\alpha_r \tilde{A}_r$ with some reservoirs ensuring the prescribed averages A_r through relevant values of the potentials α_r ;
- a disordered energy $-T\tilde{S}$ induced by the maximum entropy assignment and enforced by the contact with a thermostat at temperature T .

If the Hamiltonian of the system \mathcal{H} is parameterized by the boundary conditions Θ , differential calculations obtained from (A.6) yield the variation of the Gibbs' free energy with respect to its state variables:

$$dG = -\sum_{r \geq 2} A_r d\alpha_r - S dT + \sum \mathbf{C} \cdot d\Theta \quad (\text{A.12})$$

where the torque \mathbf{C} applied by the actuator Θ to the system is derived from the virtual works principle:

$$\mathbf{C} = \mathbf{grad}_\Theta G \quad (\text{A.13})$$

Conversely, for isothermal processes, derivatives of the Gibbs' free energy provide state equations:

$$A_r = -\frac{\partial G}{\partial \alpha_r} \quad (\text{A.14})$$

As experimental evidence, the energy couplings in the context of electromagnetism refer to three contributions (figure 3):

- the boundary conditions prescribed by the angular positions of the actuators' moving bodies Θ ;
- a magnetic term (ϕI) where the magnetic flux ϕ is created by the electrical current I exciting the generator;
- an electrostatic term (QV_0) where Q is the electric charge squeezed from the earth at the voltage V_0 .

In the following, a thermodynamic interpretation of Faraday's Law within the quasi-static approximation is given by adopting a local viewpoint.

2. Where electromagnetism is recovered

Usually, thermodynamic approaches to electromagnetism do not consider any extension towards time-varying regimes [23]. Whereas some improvements are summarized in [24] for steady state regimes, no general contribution is available for transients. The magnetodynamic behavior of any electrical system is derived from the functional [25]:

$$P_{\text{mech}} - \frac{dE_{\text{kin}}}{dt} - \frac{dG}{dt} = \min_{H,E} \left(\int_C \sigma^{-1} (\mathbf{curl} \mathbf{H})^2 d^3 r + \frac{d}{dt} \int (\mathbf{B}(\mathbf{H}) \cdot \mathbf{H} + \mathbf{D}(\mathbf{E}) \cdot \mathbf{E}) d^3 r \right) \quad (\text{B.1})$$

where the functional in the RHS exhibits:

- the magnetic field \mathbf{H} related to free and displacement currents according to the Maxwell-Ampere equation:

$$\mathbf{curl} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial_t \mathbf{D} \quad (\text{B.2})$$

While the quasi-static approximation enforces a vanishing electric displacement ($\mathbf{D} \equiv 0$) in conductors (i.e. no free charges), the charge conservation at the various interfaces provides the continuity equation:

$$\mathbf{n} \times ([\mathbf{H}] - \mathbf{V} \times [\mathbf{D}]) = 0 \quad (\text{B.3})$$

where \mathbf{V} is the velocity of the interfaces in the rest frame, \mathbf{n} the unit vector oriented by the interface and $[\cdot]$ denotes the discontinuity field occurring thereon;

- the Joule losses P_{Joule} monitored in conductors. This term is even to respect invariance of losses with the inversion of time (σ^{-1} is the resistivity);
- the time variation of the electromagnetic energy coupling the field with generator I and mass V_0 ;
- the magnetic $\mathbf{B}(\mathbf{h})$ and electrostatic $\mathbf{D}(\mathbf{e})$ behavior laws derived from thermostatic equilibrium of the Gibbs potential:

$$G(I, V_0) = G_m + G_e = \int \left(\int_0^H (-\mathbf{B}) \cdot d\mathbf{h} + \int_0^E (-\mathbf{D}) \cdot d\mathbf{e} \right) d^3 r \quad (\text{B.4})$$

where flux density \mathbf{B} and electric displacement \mathbf{D} are divergence-free to ensure that G is a state-function.

Galilean covariance states that stationary conditions expressed from (B.1) do adopt a form independent of the Galilean frame where the time-derivation is performed. Introducing \mathbf{V}' as the relative velocity of the frame ($'$) in (B.1), some calculations on the convective derivative of the electromagnetic energy coupling yield the transformation law for the electric field:

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B} \quad (\text{B.5})$$

whereas the flux density and the electric displacement are retained:

$$\mathbf{B}' = \mathbf{B} \quad (\text{B.6})$$

$$\mathbf{D}' = \mathbf{D} \quad (\text{B.7})$$

Hence, extending the electric field in a moving conductor (with the velocity \mathbf{V}) according to Ohm's law with motion:

$$\mathbf{E} = \sigma^{-1} \mathbf{J} - \mathbf{V} \times \mathbf{B} \quad (\text{B.8})$$

Maxwell-Faraday's equation:

$$\mathbf{curl} \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B} \quad (\text{B.9})$$

and its subsequent continuity equation:

$$\mathbf{n} \times ([\mathbf{E}] + \mathbf{V} \times [\mathbf{B}]) = 0 \quad (\text{B.10})$$

may be viewed as acting locally to make an overall check of the tendency towards reversibility. This striking property provides a thermodynamic-oriented insight into the variational theory of electromagnetism [26]. Hence, the functional (B.1) balances the time variations of the co-energy ($-G$) and the mechanical power received by the field from the actuators $P_{\text{mech}} - \frac{dE_{\text{kin}}}{dt}$ where E_{kin} is the kinetic energy embedded within the whole system.

It should be noted that the Maxwell-Faraday equation (B.9) provides divergence-free flux density at any time, which is a mandatory condition to derive (B.5) in its usual form. Similarly, the transformation law of the magnetic field reads:

$$\mathbf{H}' = \mathbf{H} - \mathbf{V} \times \mathbf{D} \quad (\text{B.11})$$

according to (B.3).

In order to consider sub-systems for design purposes or power management, it is convenient to introduce electrical power to the domain Ω :

$$P_{\text{elec}}(\Omega) = - \oint_{\partial\Omega} (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot \mathbf{n} d^2 r \quad (\text{B.12})$$

so that the contribution of Ω to (B.1) reads:

$$P_{\text{mech}}(\Omega) - \frac{dE_{\text{kin}}}{dt}(\Omega) + P_{\text{elec}}(\Omega) - \frac{dG}{dt}(\Omega) \quad (\text{B.13})$$

Table B.1 Regimes allowed within the quasi-static limit (from [27]). The resolution is performed in two steps: The first (second) one involves the dominant (marginal) coupling. The arrow (\Leftarrow) denotes a field obtained from the main resolution which acts as a source for the marginal one.

	magnetic regime $ \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} \gg \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} $	electric regime $ \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} \ll \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} $
conductors	$\begin{aligned} \text{curl}(\sigma^{-1} \text{curl} \mathbf{H}) &= -\frac{d\mathbf{B}}{dt} \\ \text{div} \mathbf{B} &= 0 \\ \text{curl} \mathbf{H} &= \mathbf{J} \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} \end{aligned}$	N/A
dielectrics	$\begin{aligned} \text{div} \mathbf{B} &= 0 \\ \text{curl} \mathbf{H} &= 0 \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \text{div} \mathbf{D} &= 0 \\ \text{curl} \mathbf{E} &= 0 \\ \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E} \end{aligned}$
	$\begin{aligned} \text{curl} \mathbf{E} &\Leftarrow -\frac{d\mathbf{B}}{dt} \\ \text{div} \mathbf{D} &= 0 \\ \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E} \\ (\partial C) \mathbf{n} \times \mathbf{E} &\Leftarrow \mathbf{n} \times (\sigma^{-1} \mathbf{J} - \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \end{aligned}$	$\begin{aligned} \text{curl} \mathbf{H} &\Leftarrow \frac{d\mathbf{D}}{dt} \\ \text{div} \mathbf{B} &= 0 \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} \\ (\partial C) \mathbf{n} \times [\mathbf{H}] &\Leftarrow \mathbf{n} \times (\mathbf{V} \times \mathbf{D}) \end{aligned}$
Contribution to the functional (B.13)	$\begin{aligned} P_{\text{mech}}(\Omega) - \frac{dE_{\text{kin}}}{dt}(\Omega) + \\ P_{\text{elec}}(\Omega) - \frac{dG_m}{dt}(\Omega) \end{aligned} \quad (\text{B.14})$	$\begin{aligned} P_{\text{mech}}(\Omega) - \frac{dE_{\text{kin}}}{dt}(\Omega) + \\ P_{\text{elec}}(\Omega) - \frac{dG_e}{dt}(\Omega) \end{aligned} \quad (\text{B.15})$

The set of transformation laws (B.6), (B.7), (B.5) and (B.11) is not compatible with the invariance of the behavior laws, at least in a vacuum. As quasi-static phenomena are observed, it is mandatory to admit that one coupling term in (B.1) is much more prevalent than the other. As a result, the quasi-static limit must be split into magnetic and electric regimes (Table B.1) [27]. It should be noted that the conductors are always depicted within the magnetic regime of the quasi-static limit.

3. A thermodynamic insight into generation

In order to quantify the order of magnitude of the magnetic and kinetic reserves along with their behavior under load fluctuation (figure 4), we adopt a one-loop power grid description where (figure C.1):

- generation is provided by a 3-phase synchronous machine, typically installed in a French nuclear plant (900MW);
- consumption is aggregated within a single Ohmic load, the variation of which enables us to study the system's dynamics under fluctuation.

On the one hand, the mechanical energy conservation rules the angular velocity of the rotor $\dot{\Theta}$:

$$J \frac{d\dot{\Theta}}{dt} = \frac{P_{\text{mech}}}{\dot{\Theta}} - C \quad (\text{C.1})$$

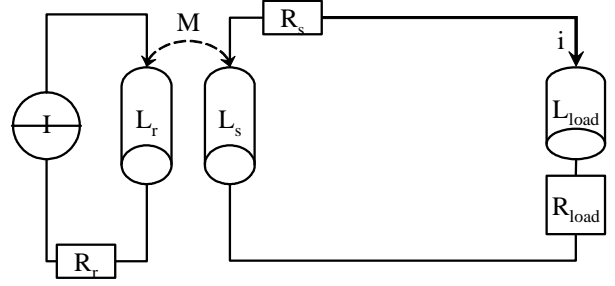


Figure C.1 Equivalent lumped circuit for the power system. When the rotor is made to rotate at a constant speed (primary), the three phases (secondary) experience a periodically varying magnetic field. Here they are gathered thanks to a Park's transformation [28].

On the other hand, the electric behavior of the secondary loop is given by the 2nd Kirchhoff's law:

$$R_{\text{load}} i + (L_{\text{load}} + L_s) \frac{di}{dt} = e(t) \quad (\text{C.2})$$

where the voltage drop across the transmission line is neglected, i is the current flowing in the winding/phase, and e is the electromotive force of the machine (opened-circuit voltage), given by Faraday's law of induction (appendix B.9).

Thanks to a first-order development of $\dot{\Theta}$ around the rated shaft speed $\dot{\Theta}_0$ in (C.1), the resolution of (C.1) and (C.2) exhibits two relaxation time constants characterizing any fluctuation on the system. They are:

$$\tau_{\text{elec}} = \frac{L_{\text{load}} + L_s}{R_{\text{load}}} \quad (\text{C.3})$$

$$\tau_{\text{mech}} = \frac{J \dot{\Theta}_0^2}{P_{\text{mech}}} \quad (\text{C.4})$$

corresponding respectively to the relaxation of both the current i and the shaft speed $\dot{\Theta}$. The typical characteristics of the system gathered in table C.1, provide the order of magnitude of these relaxation time constants. Introducing the electrical angular velocity:

$$\omega = p \dot{\Theta} \quad (\text{C.5})$$

where p is the number of pairs of poles, the electrical period ($2\pi/\omega$) appears:

- much higher than the electrical relaxation time constant τ_{elec} , i.e. a mechanically enforced steady-state regime is recovered in about one electrical period;
- much smaller than the mechanical relaxation time constant τ_{mech} , i.e. the shaft speed undergoes significant variation over a few hundred electrical periods.

As a result:

- assuming linear behavior, it is possible to adopt a time-harmonic description of the electrical part of the system, i.e. $\frac{d}{dt} \rightarrow j\omega$. Hence, the opened-circuit voltage drop is given by Faraday's Law (appendix B.9):

$$\bar{\mathbf{E}} = M \bar{\mathbf{I}} \omega \quad (\text{C.6})$$

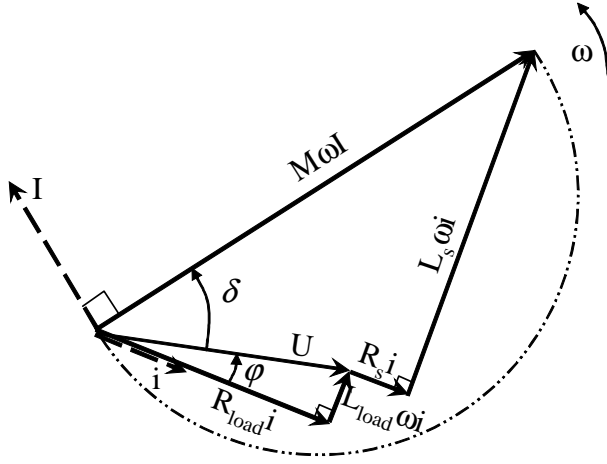


Figure C.2 Phasor diagram for the AC synchronous motor (round rotor model). The solid lines (resp. dashed) are associated with voltage drops (resp. current).

where the $\bar{}$ stands for rms values, and the current i flowing in the winding may be analytically derived from figure C.2.

- the electrodynamical torque to take into account in (C.1) can be averaged over a period:

$$C = \frac{\bar{E} \bar{i} \cos(\delta + \varphi)}{\omega} \quad (C.7)$$

After some calculations, the averaged magnetic Gibbs' free energy (appendix B.4) is consolidated from elementary components of the whole circuit (figure C.1) and reads:

$$G_m(\bar{I}) = -\frac{1}{2} L_r \bar{I}^2 \left(1 - \frac{L_s}{L_s + L_{load}} k^2 \sin^2(\delta + \varphi) \right) \quad (C.8)$$

where $0 \leq k \leq 1$ is the coupling coefficient of the machine. The magnetic flux, derived from (appendix A.14), is made up of two terms. The first is the flux in the rotor for an open-circuited stator, and the second reduces it by a revolving flux due to the load:

$$\bar{\Phi} = L_r \bar{I} \left(1 - \frac{L_s}{L_s + L_{load}} k^2 \sin^2(\delta + \varphi) \right) \quad (C.9)$$

For perfect coupling and an inductance-free load, the magnetic flux vanishes at a power factor angle of 90° , leading to the collapse of the transmission. For time-harmonic regime, the magnetic energy is given by (4) and matches the so-called reactive energy whereas the electrical power supplied to the load (appendix B.12) corresponds to the active power. Moreover, the kinetic energy reads:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} J \left(\frac{\omega}{p} \right)^2 \quad (C.10)$$

Table C.1 Typical characteristics of the power grid. The lumped circuit elements are obtained thanks to a Park's transformation [28].

	symbol	Definition	value
generator	P	pair of poles	1
	J	moment of inertia of the shaft	$142 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
	R_r	rotor circuit resistance	0.5Ω
	L_r	rotor circuit inductance	0.2 H
	R_s	stator winding resistance	1.02Ω
	L_s	stator winding inductance	0.645 H
	M	rotor-stator mutual inductance (perfect coupling $k = 1$)	$k \sqrt{L_s L_r}$ 0.360 H
load	R_{load}	load resistance	240Ω
	L_{load}	load inductance ($\cos \varphi = 0.99$)	0.1 H
network (rated values)	P_{mech}	mechanical power supplied	900 MW
	\bar{I}	rotor excitation current	$5,776 \text{ A}$
	ω	electrical angular velocity	314 rd/s
	$2\pi/\omega$	electrical period	20 ms
	τ_{elec}	electrical relaxation time	3.1 ms
	τ_{mech}	mechanical relaxation time	15.6 s
	E_{kin}	embedded kinetic energy	7 GJ
	F_m	magnetic energy	2.1 MJ
	\bar{E}	opened-circuit voltage	651 kV
	\bar{U}	terminal voltage	469 kV
	\bar{i}	winding/phase current	$1,935 \text{ A}$
	P_{elec}	active power supplied	896 MW
	δ	torque angle	38°
	$\delta + \varphi$	power factor angle	45°

Brevet [46] relatif au chapitre 4

prospective et vecteur électrique



BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITE

Réception électronique de la soumission

Il est certifié par la présente qu'une demande de brevet (ou d'un certificat d'utilité) a été reçue par le biais du dépôt électronique sécurisé de l'INPI. Après réception, un numéro d'enregistrement et une date de réception ont été automatiquement attribués.

Numéro de demande	1161087	
Numéro de soumission	1000132254	
Date de réception	02 décembre 2011	
Vos références	SCH022FR	
Demandeur	SCHNEIDER ELECTRIC INDUSTRIES SAS	
Pays	FR	
Titre de l'invention	Procédé d'estimation de la stabilité d'un système électrique	
Documents envoyés	package-data.xml application-body.xml requetefr.pdf (3 p.) comment.pdf (1 p.) design.pdf (2 p.) dessins.pdf (3 p.)	requetefr.xml fr-fee-sheet.xml validation-log.xml indication-bio-deposit.xml fr-office-specific-info.xml textebrevet.pdf (27 p.)
Déposé par	CN=Stephane MOREAU,O=AIVAZIAN MOREAU-NOVAIMO,C=FR	
Méthode de dépôt	Dépôt électronique	
Date et heure de réception électronique	02 décembre 2011, 14:42:32 (CET)	
Empreinte officielle du dépôt	CC:21:59:9E:75:F5:99:62:67:2E:4C:EC:F5:26:FA:92:2A:CE:17:A6	

/INPI, section dépôt/

Résumé

Ce mémoire illustre la difficile déclinaison du paradigme de l'optimalité lors de sa confrontation aux principes de réalité de systèmes toujours plus complexes.

Après avoir récapitulé l'expérience de recherche acquise à travers des contributions variées, qui nous emmènent de problèmes de contrôle en dimension infinie à des applications dans les domaines du spatial, de l'énergie et de l'automobile, les développements spécifiques en matière de prospective long terme seront l'objet d'une attention particulière.

Ainsi, le credo que l'optimalité est un canevas nécessaire pour envisager les enjeux d'une modélisation du long terme sera défendu, soutenant l'idée que cette approche devra rester centrale dans nos perspectives de recherche.

Mais dans la tradition d'une formation "à la française", cette réflexion ne saura être menée sans revenir au préalable sur les grands principes sous jacents à l'optimalité et leur liaison naturelle avec l'étude des systèmes dynamiques.

Abstract

This work illustrates the difficulty of implementing an optimality paradigm while dealing with increasingly complex systems to address real world issues.

After summing up research experience acquired from varied sources, taking us from infinite dimension control issues to applications in the fields of space, energy and the car industry, we focus on specific developments in long-term issues.

As a result, we defend our conviction that optimality provides a necessary framework for anticipating the challenges of long-term modeling, and maintain that this approach must remain central to our research perspectives.

However, in line with our French mindset and education, we consider that a discussion of this kind starts with a look at the major principles underlying optimality and their natural link with the study of dynamic systems.